

EMCに関する洞察とソリューション

# DC/DCコンバータの EMCトラブルシューティング

岩本純一  
シニアFAEマネージャー  
MPSジャパン

2022年6月



# 岩本純一 – シニアFAEマネージャー



## 2017年–現在

- MPSにてシニアFAEマネージャーとしてパワーマネジメント製品を担当

## 2006–2017年

- テキサスインスツルメンツにて、パワーシステムデザインとフィールドアプリケーションエンジニアの業務に従事

## 2000–2006年

- TDKにて、ブリックコンバータ、TV用バックライトシステム、産機向け電源など、さまざまな電源を設計
- 同設計開発により、いくつかの論文、特許を取得

## 1995–2000年

- タムラ製作所にて、ロボット用充電器、航空機向け電源、バックライトシステム、探査衛星用電源設計などを経験

## 本日のトピック

- EMCの不具合に関するトラブルシューティング
- EMCトラブルシューティング用ツール
- 電子を動かす基礎
- MPS評価ボード例
- EMCにおけるインダクタの影響

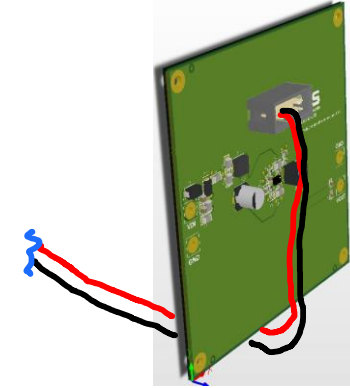
# 構造化されたトラブルシューティング

- DUTでどのEMC試験に失格しましたか? (放射または伝導エミッション)
- 耐性は?
- 試験のセットアップはどのようなものですか?
- ハウジングは金属ですか? プラスチックですか?
- ケーブルはシステムに接続されていますか?
- どの周波数でDUTは制限を超過しますか?
- ソースクロックを識別できますか?
- DC/DCコンバータはシステムのどこに置かれていますか?



# 構造化されたトラブルシューティング

- フィルタは各ケーブルに設置されていますか？
- DC/DCからケーブル / コネクタへの距離はどうか？
- すべての高 $dv/dt$ および $di/dt$ 回路ノードを識別しマークします！
- 潜在的なカップリングの回路ノードのルーティングを確認
- スナップオン方式のフェライトをケーブルに使用し、CMとDMを区別する
- DC/DCコンバータブロックにシールドを設置する



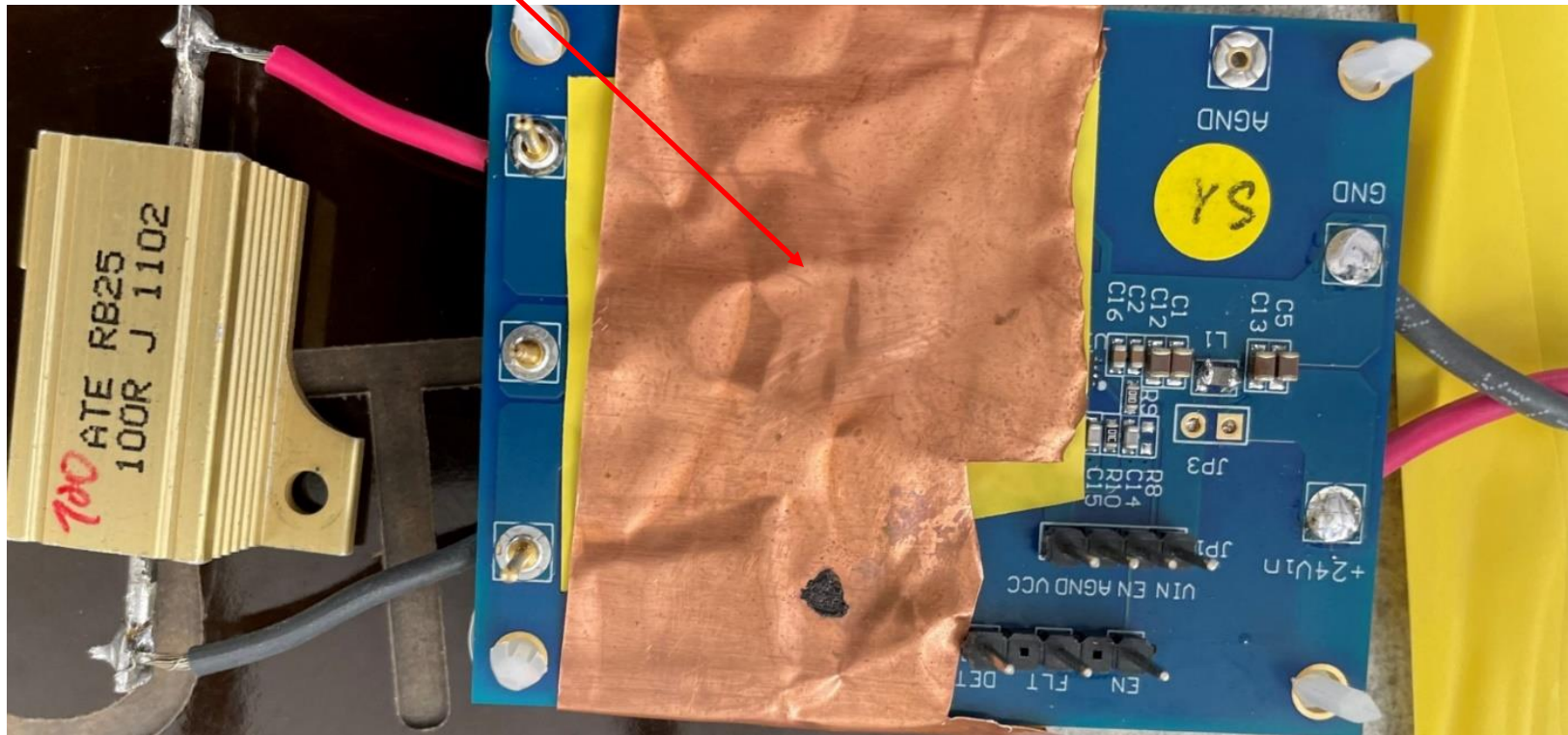
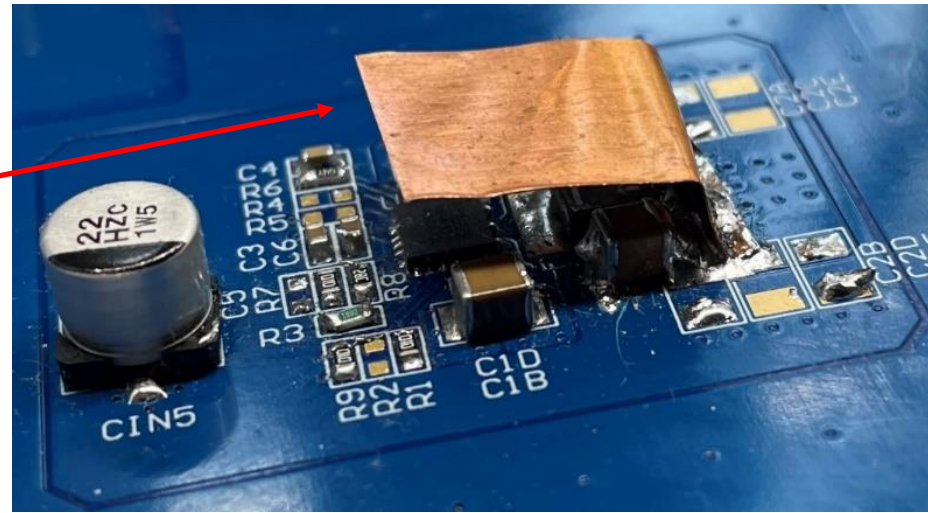
# トラブルシューティング用のツールセット

- **銅箔:** 特定領域、デバイス周辺にシールドを作るために使用し、GND接続は修正必要。低コストで万能。
- **スナップオン方式のフェライト:** ケーブル付近の高周波数シグナルに対するインピーダンスを生成するために使用。低コストだが万能ではない。
- **フィールドプローブ:** 回路基板において比較的高い磁界強度領域を特定するために使用。  
注) 高磁界強度領域を特定することはEMC問題の発生源を特定することにつながるとは限らないが、このような領域が問題の発生源である可能性は高い。中程度のコストで万能。
- **電流プローブ:** 差動モードおよびコモンモード電流を見るために使用するスペクトラムアナライザと併せて使用される。差動モードとコモンモードを区別するのに便利。コスト高で万能ではない。

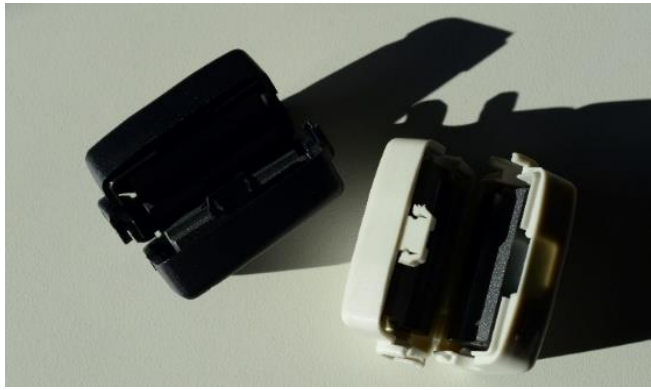
# 銅箔使用例

DC/DCとコイルに始まり

.... PCBのより広い部分へ



# スナップオン方式のフェライト使用例





# フィールドプローブ使用例

## HおよびEフィールドプローブ



スコープ、スペクトラムアナライザ  
またはEMCレシーバとともに使用

- 移動電荷は電磁場を生成 - 「右手の法則」
- 反対方向への移動による電荷はキャンセル作用の反対方向の磁界を生成
- 導体に作用した電磁場は、自由に動く荷電粒子を生成
- 立ち上がり時間と立下り時間は振動数成分や振幅に影響 - 5ns vs. 10nsでは100 MHzで最大100回程度異なる
- 18 AWG、1A電流時の電子のドリフト速度は約 $74 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$
- エミッション: 20dB $\mu$ V  $\rightarrow$  200nA into 50 $\Omega$ ,  
耐性: 0.2V  $\leftarrow$  200nA into 1M $\Omega$
- ソースを離れるすべての電荷が可能な限り最小のパス / ループを使用して  
ソースに戻る場合、ALSEチャンバは稼働しない

# EMCの基礎

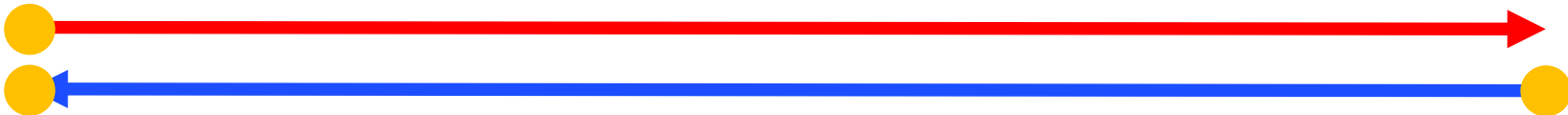
ケース1 – 右方向に動くすべての電荷において、左側に動く電荷がある



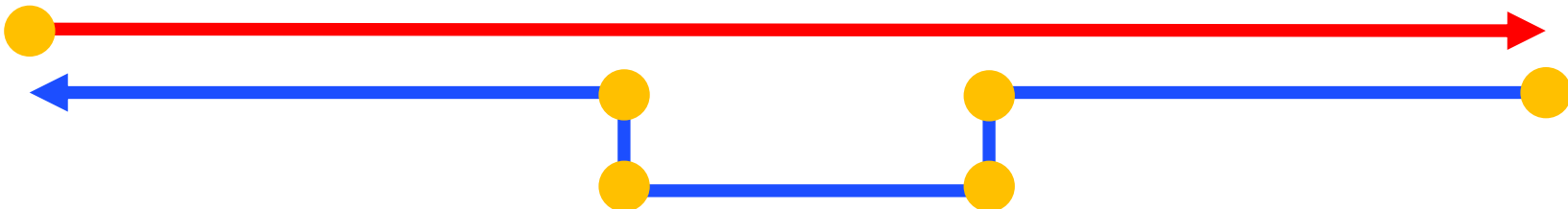
ケース2 – 同等でない量の電荷がそれぞれの方向に対して動いている



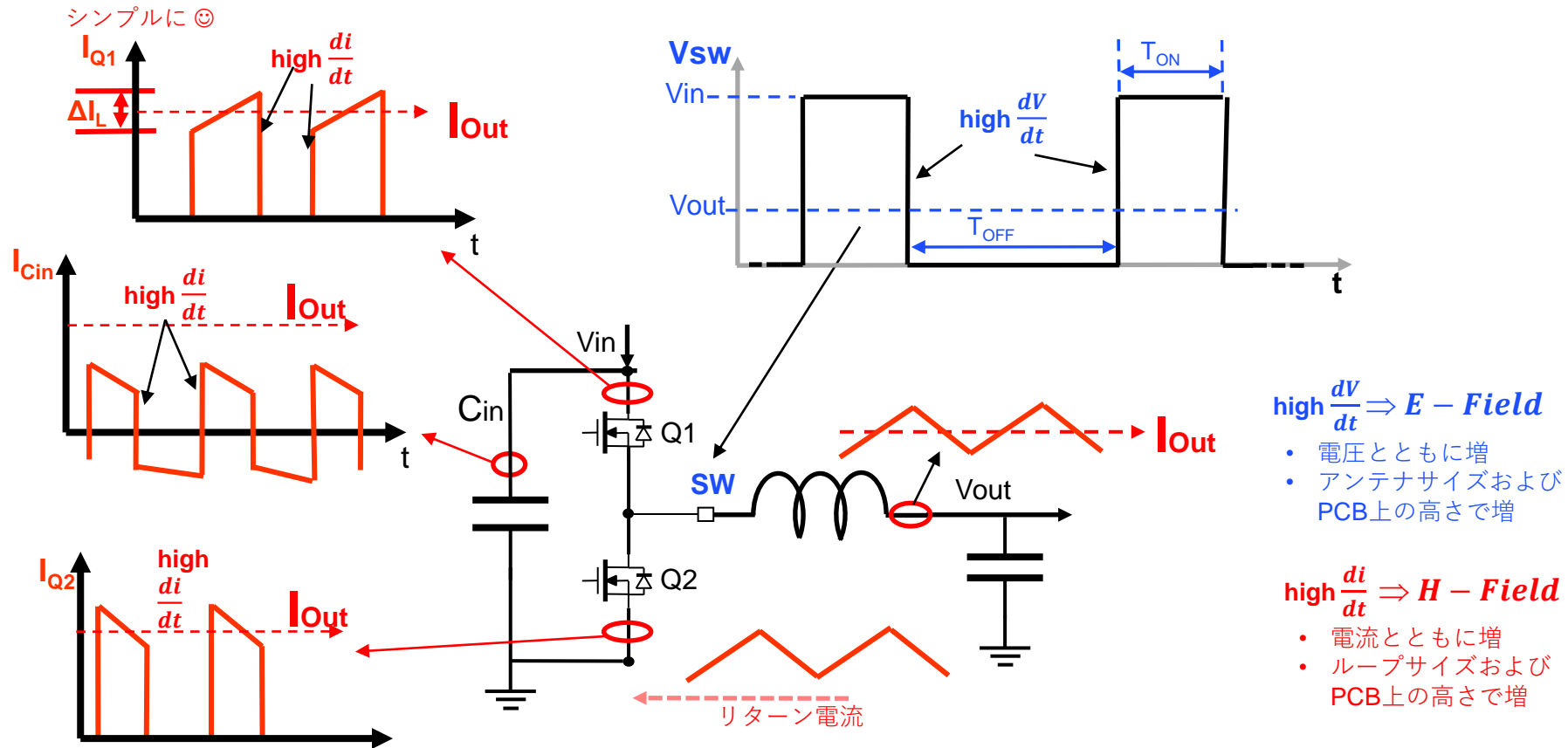
ケース3 – 同じ方向に動いている電荷がある



ケース4 – 双方向に同等の電荷があるが、経路が異なる



# 気分を変えて: 降圧コンバータの電圧と電流波形



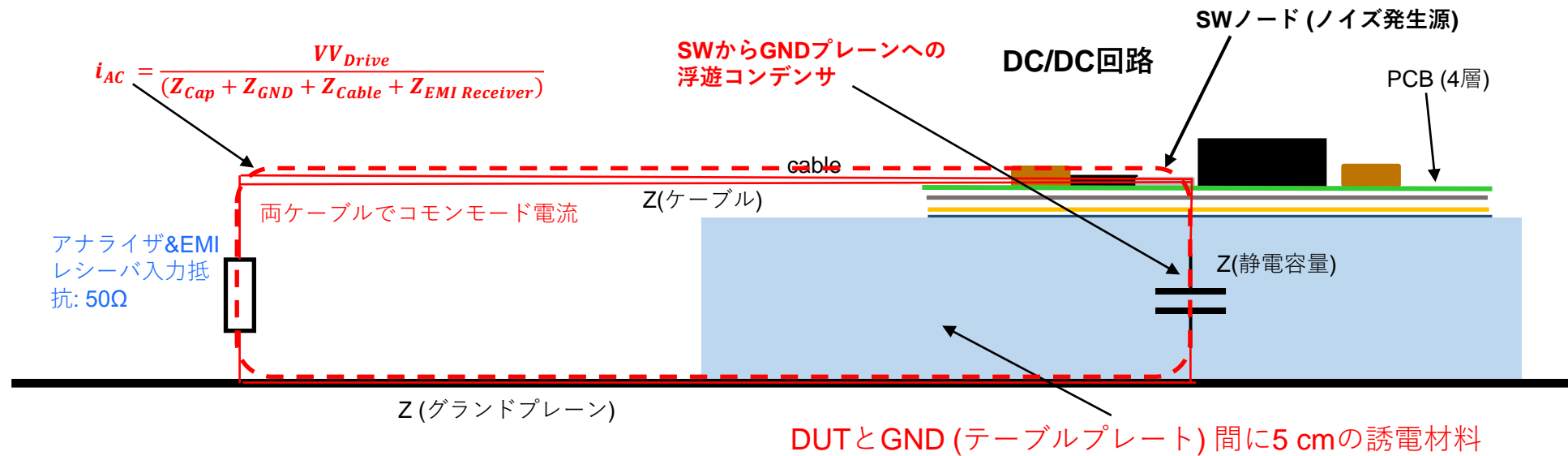
....昇圧コンバータはこれを反転させたもの

# CE FM帯コモンモードノイズ

降圧コンバータは13V入力、2 MHzで動作  
スイッチングで100 MHzにおいて最大260mVで動作

OEM AVリミット: EMIレシーバ50Ωに4μVで12dBμV

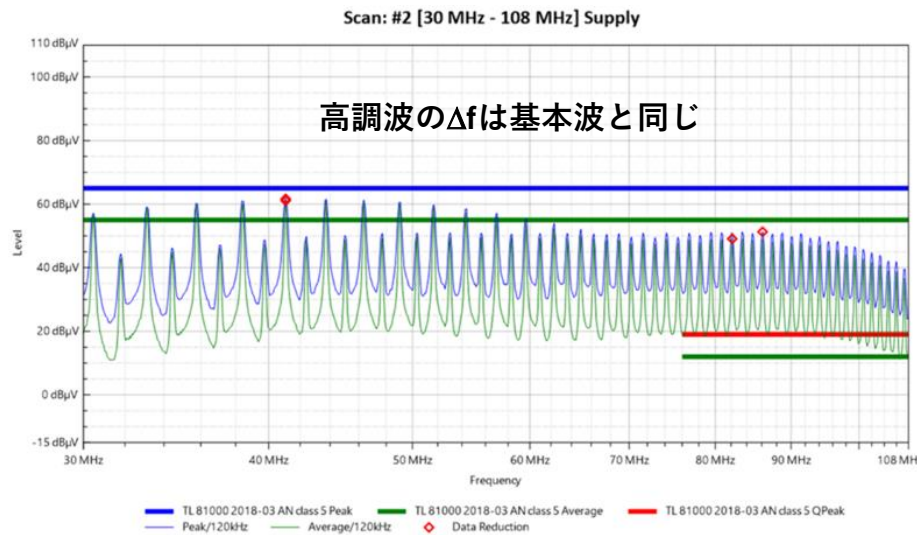
100 MHzでACループを流れる電流は80nA以下でなければならない



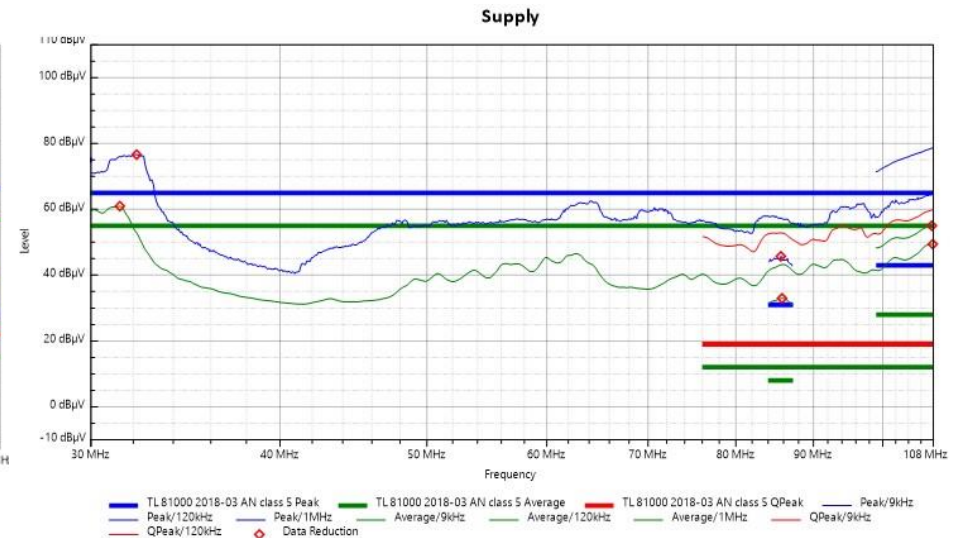
# 発生源を特定する

リミットより上にいってしまっている箇所の山の周波数で  
発生源を見極めましょう

時に発生源は明瞭



そうでもない場合もあり



# 発生源を特定する

システムではどのクロックを使用していますか？  
すべてのクロックの正確な周波数を計測します。  
クロック、高調波、ミキシング製品のテーブルを作成します。

	f1 [MHz]	f2 [MHz]	f2 - f1 [MHz]	f1+f2 [MHz]	f3 [MHz]	f3 + f1 [MHz]	f3 - f1 [MHz]
Fsw	0.489	1.93	1.441	2.419	20.03	20.519	19.541
2x	0.978	3.86	2.882	4.838	40.06	41.038	39.082
3x	1.467	5.79	4.323	7.257	60.09	61.557	58.623
4x	1.956	7.72	5.764	9.676	80.12	82.076	78.164
5x	2.445	9.65	7.205	12.095	100.15	102.595	97.705
6x	2.934	11.58	8.646	14.514	120.18	123.114	117.246
7x	3.423	13.51	10.087	16.933	140.21	143.633	136.787
8x	3.912	15.44	11.528	19.352	160.24	164.152	156.328
9x	4.401	17.37	12.969	21.771	180.27	184.671	175.869
10x	4.89	19.3	14.41	24.19	200.3	205.19	195.41
11x	5.379	21.23	15.851	26.609	220.33	225.709	214.951
12x	5.868	23.16	17.292	29.028	240.36	246.228	234.492
13x	6.357	25.09	18.733	31.447	260.39	266.747	254.033

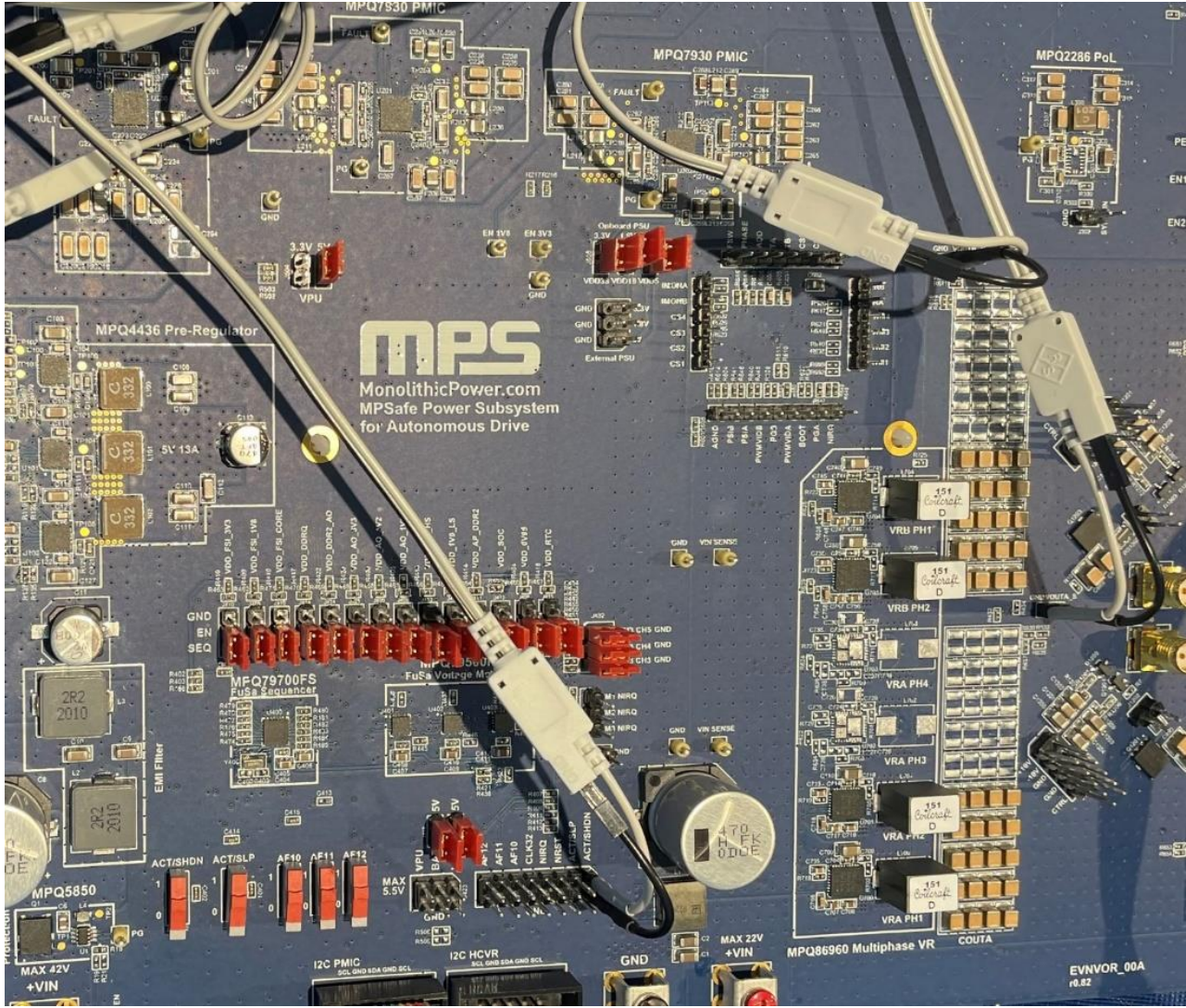
# 経路を見つける

- 入力フィルタコンデンサを2倍に増やす
- 入力フィルタコイルを2倍に増やす
- 降圧 $C_{IN}$  とフィルタの距離はどれくらいですか？
- OFFボードフィルタは有効ですか？

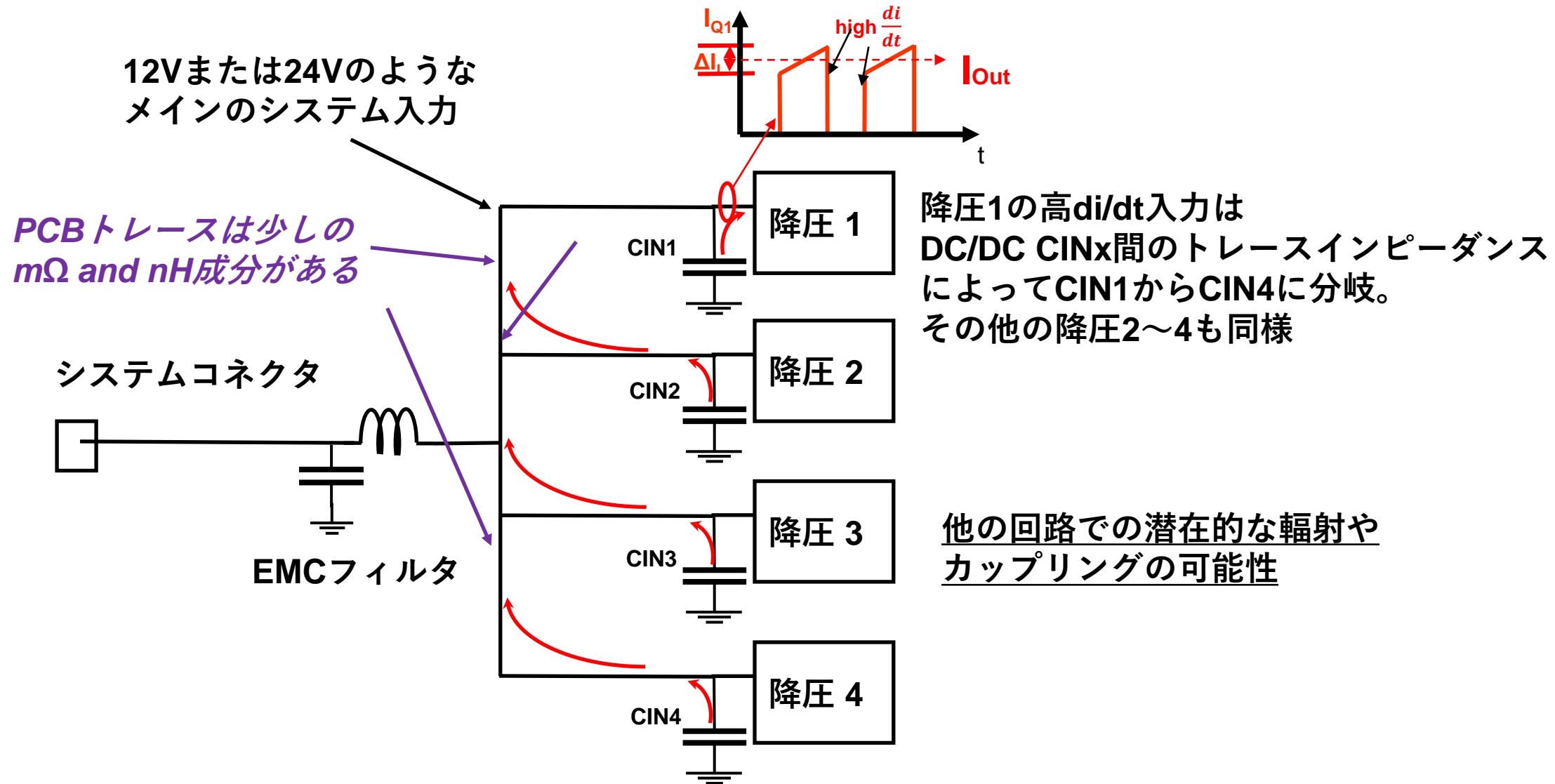




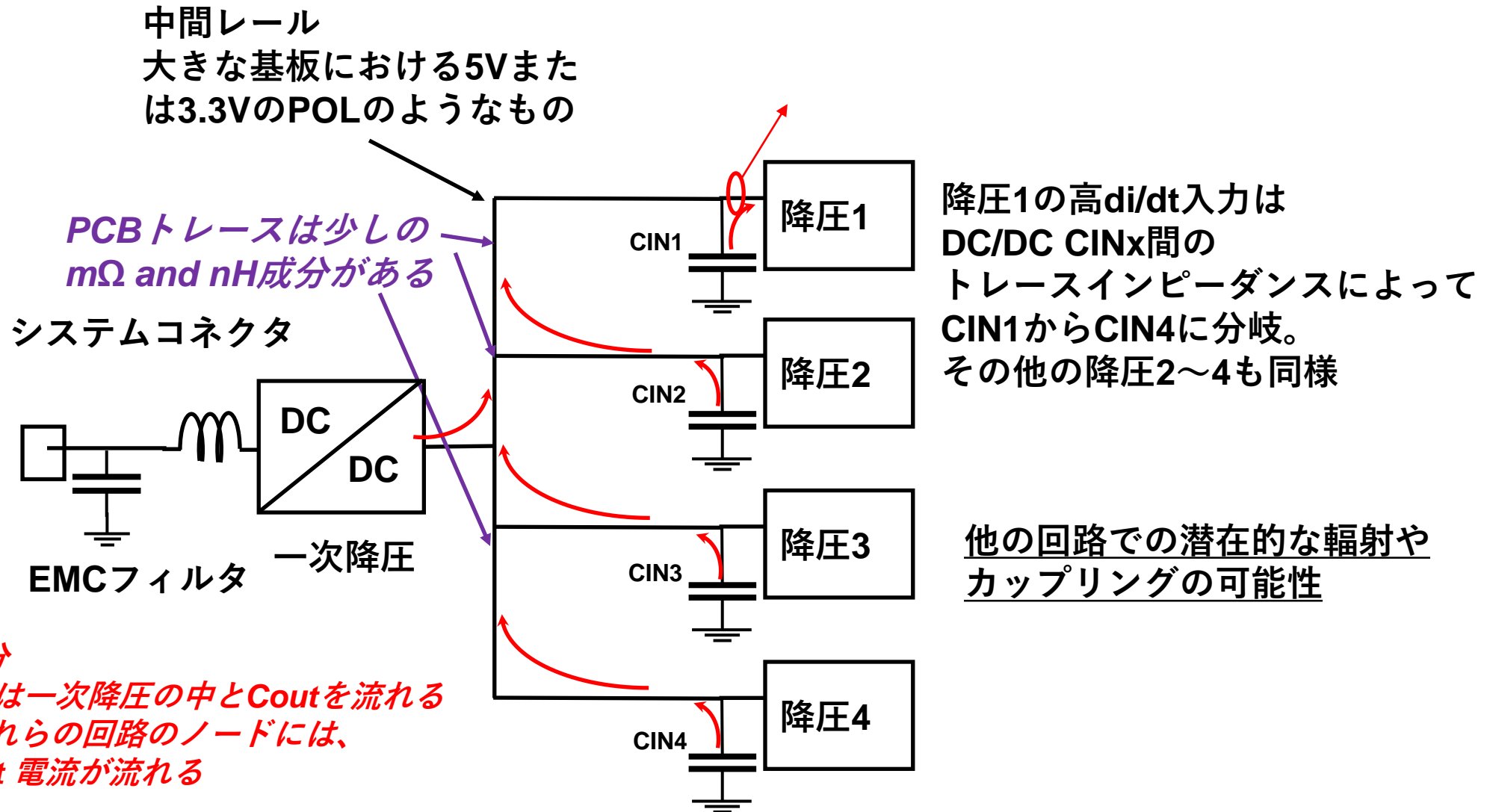
# たくさんのDC/DC電源を載せた大きな基板



# 1つの巨大なパワーレールにおける複数のDC/DC降圧レギュレータ



# 1つの巨大なパワーレールにおける複数のDC/DC降圧レギュレータ

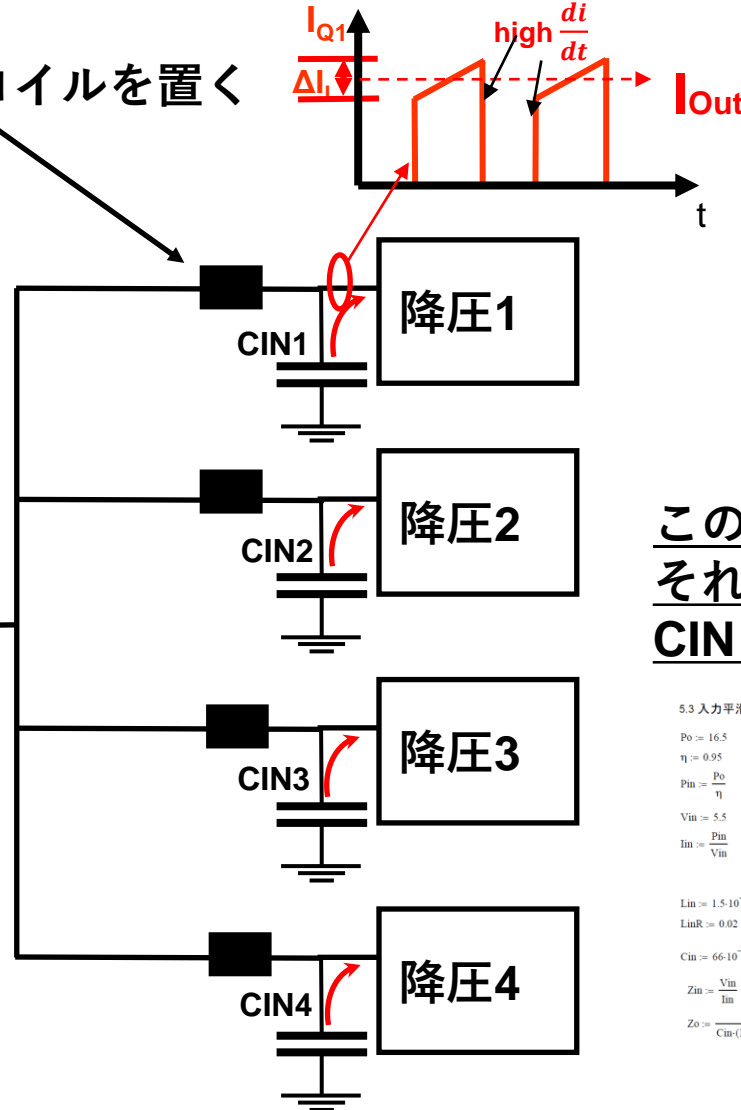
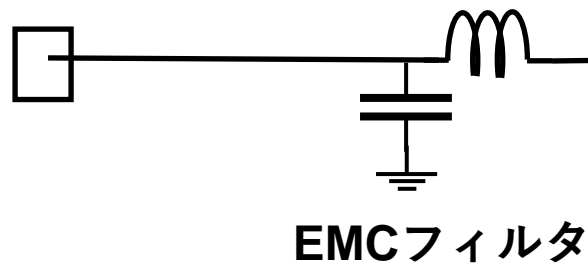


# 1つの巨大なパワーレールにおける複数のDC/DC降圧レギュレータ

それぞれのDC/DC間に  
100nHや1uHなどの小さなコイルを置く

DC/DC間の  
PCBトレースのため、  
コイルには  
より高いLが必要

システムコネクタ



このコンフィギュレーションでは、  
それぞれの降圧でそれぞれの  
CINに流れる高いdi/dtが発生!

5.3 入力平滑用コンデンサ追加資料

$$P_o = 16.5 \quad 5.5 \cdot 3 = 16.5$$

$$\eta = 0.95$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta}$$

$$V_{in} = 5.5$$

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad I_{in} = 3.158$$

最低入力、実力最大出力時の値を使用

$$L_{in} = 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \quad \text{入力フィルタのインダクタンス}$$

$$L_{inR} = 0.02 \quad \text{入力フィルタの抵抗}$$

$$C_{in} = 66 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8 \quad R_c = 1 \cdot 10^{-3} \quad \text{モジュールの入力コンデンサ容量と抵抗分ESR}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad Z_{in} = 1.742$$

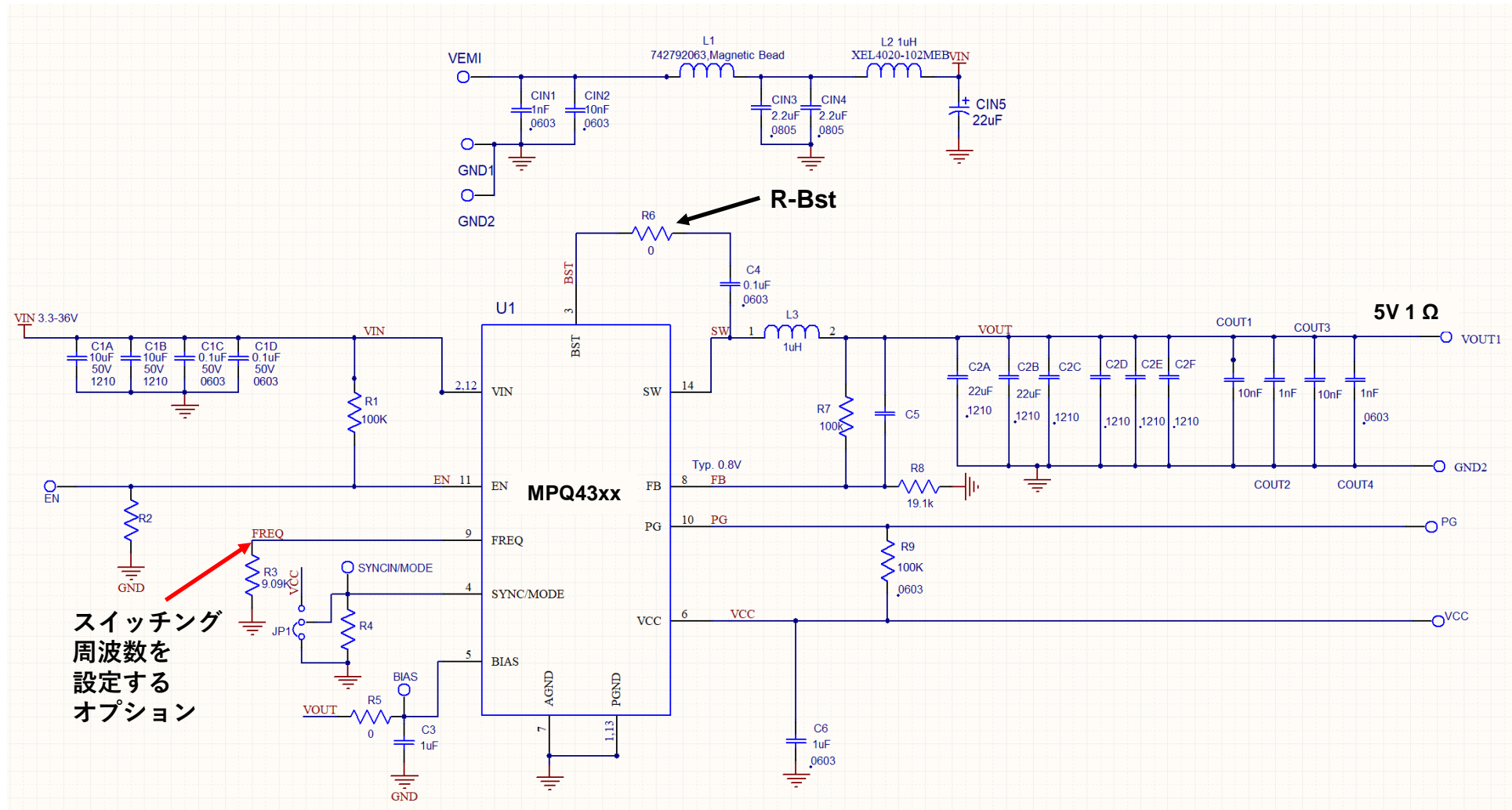
$$Z_o = \frac{L_{in}}{C_{in} \cdot (L_{inR} + R_c)} \quad Z_o = 1.353 \quad Z_{in} > Z_o \text{なので安定}$$

$$r = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{P}{I^2} = \frac{V}{I}$$

$$|Z| < |r| \rightarrow \text{Stable} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{P}{I^2} < \frac{L}{C \cdot (L + R_c)} \rightarrow \text{Stable} \\ \frac{P}{I^2} > \frac{L}{C \cdot (L + R_c)} \rightarrow \text{Unstable} \end{array} \right.$$

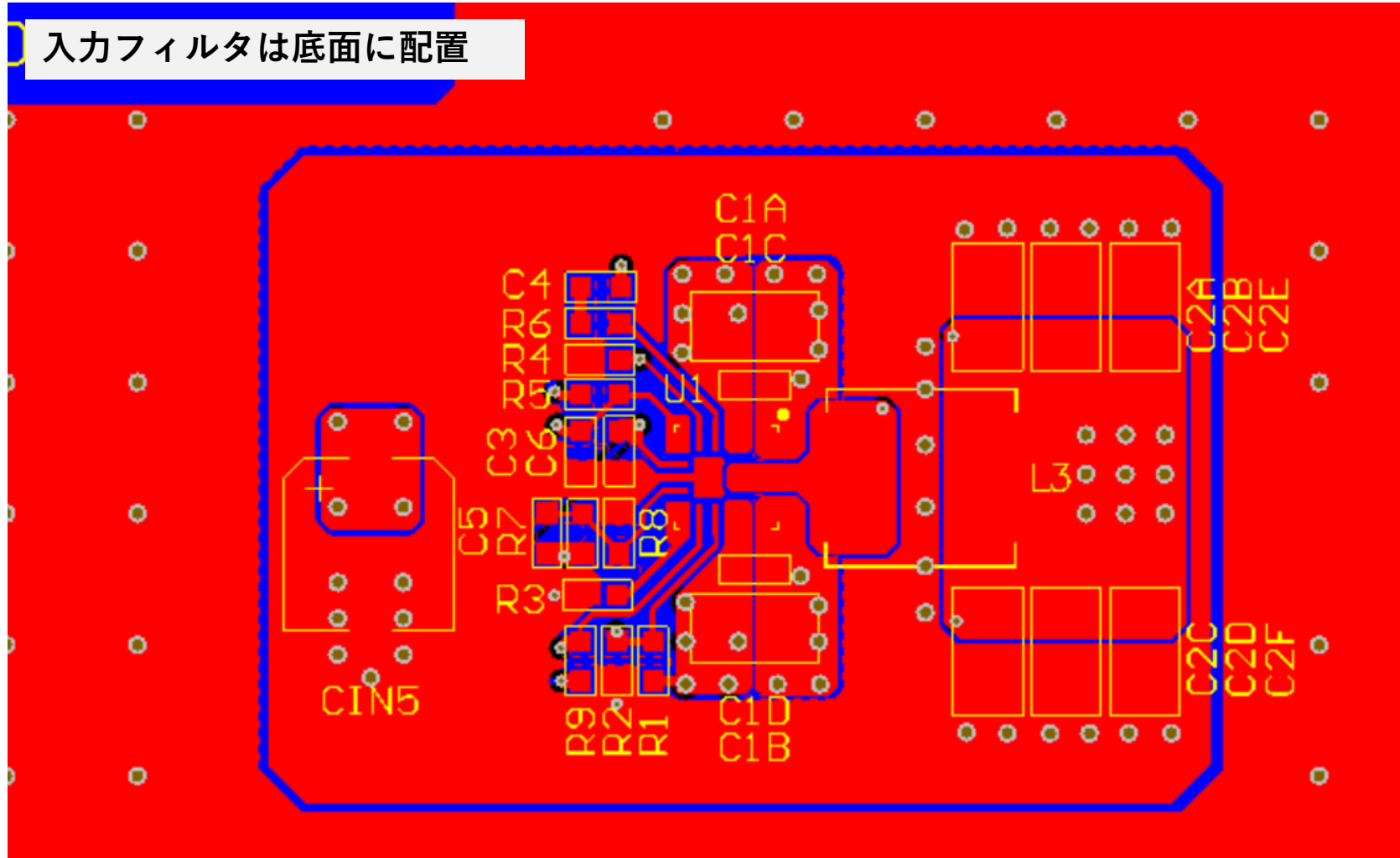
入力インピーダンス  $Z_{in} = V/I$   
出力インピーダンス  $Z_o = L/C \cdot (L + R_c)$

# MPSの例1: 5A降圧レギュレータ、スイッチング周波数=2MHz

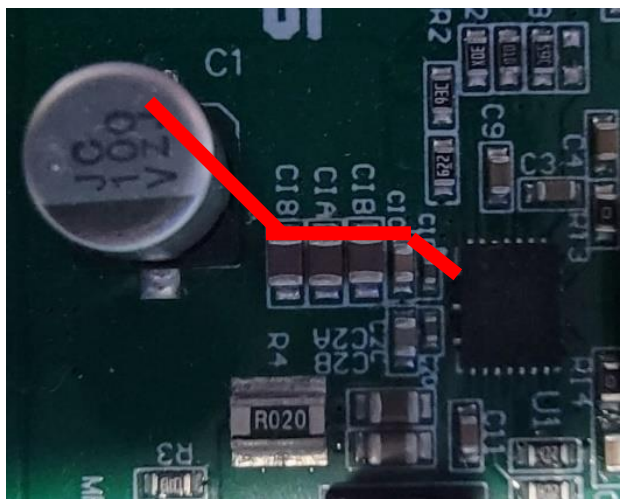
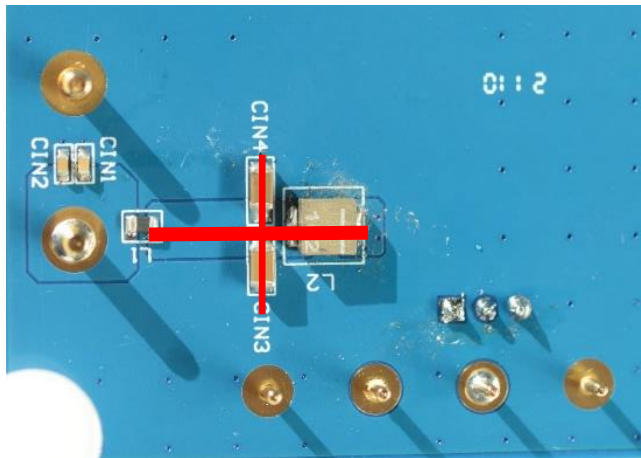


# トップレイヤ

入力フィルタは底面に配置

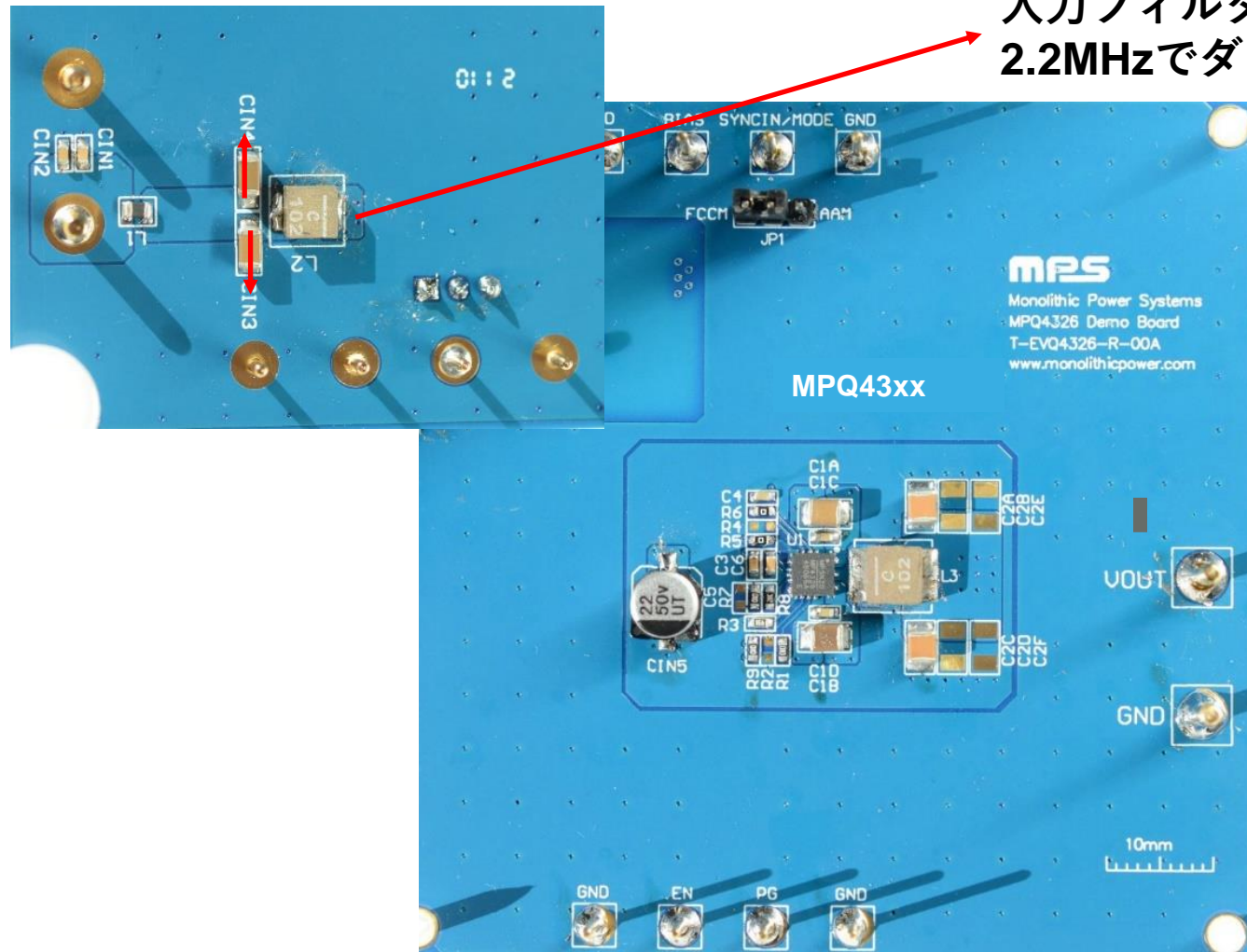


# ‘T’ キャパシタ vs. ‘I’ キャパシタの設計



# MPQ43xx 5V 5A 降圧レギュレータ、 2.2MHz SSFM機能付き

下部に入力フィルタ



入力フィルタは約50dB  
2.2MHzでダンピング



# 入力L/Cフィルタ – 単純化された1段および2段

入力EMCフィルタ: 1段 vs. 2段

=パラメータを入力

Single Stage	Fundamental	1st Harm	2nd Harm	3rd Harm	4th	5th
Fsw:	2.20 MHz	4.40	6.60	8.80	11.00	13.20
Omega-Fsw	13.82 1/μs	27.65	41.47	55.29	69.11	82.94
L_single:	0.33 μH					
XL:	4.56 Ohm	9.12	13.68	18.25	22.81	27.37
C-effective:	0.70 μF					
XC:	0.10 Ohm	0.052	0.034	0.026	0.021	0.017
Damping	-33.09 dB	-44.99	-52.00	-56.99	-60.86	-64.03
<b>Two stage filter design:</b>						
1st L:	0.10 μH					
XL:	1.38 Ohm	2.76	4.15	5.53	6.91	8.29
1st C:	0.60 μF					
XC:	0.121 Ohm	0.060	0.040	0.030	0.024	0.020
Damping 1	-21.91 dB	-33.42	-40.36	-45.32	-49.18	-52.33
2nd L:	0.10 μH					
XL:	1.38 Ohm	2.76	4.15	5.53	6.91	8.29
2nd C:	0.40 μF					
XC:	0.181 Ohm	0.090	0.060	0.045	0.036	0.030
Damping 2:	-18.73 dB	-29.99	-36.88	-41.82	-45.67	-48.82
Total Damping:	-40.65 dB	-63.40	-77.23	-87.13	-94.84	-101.16

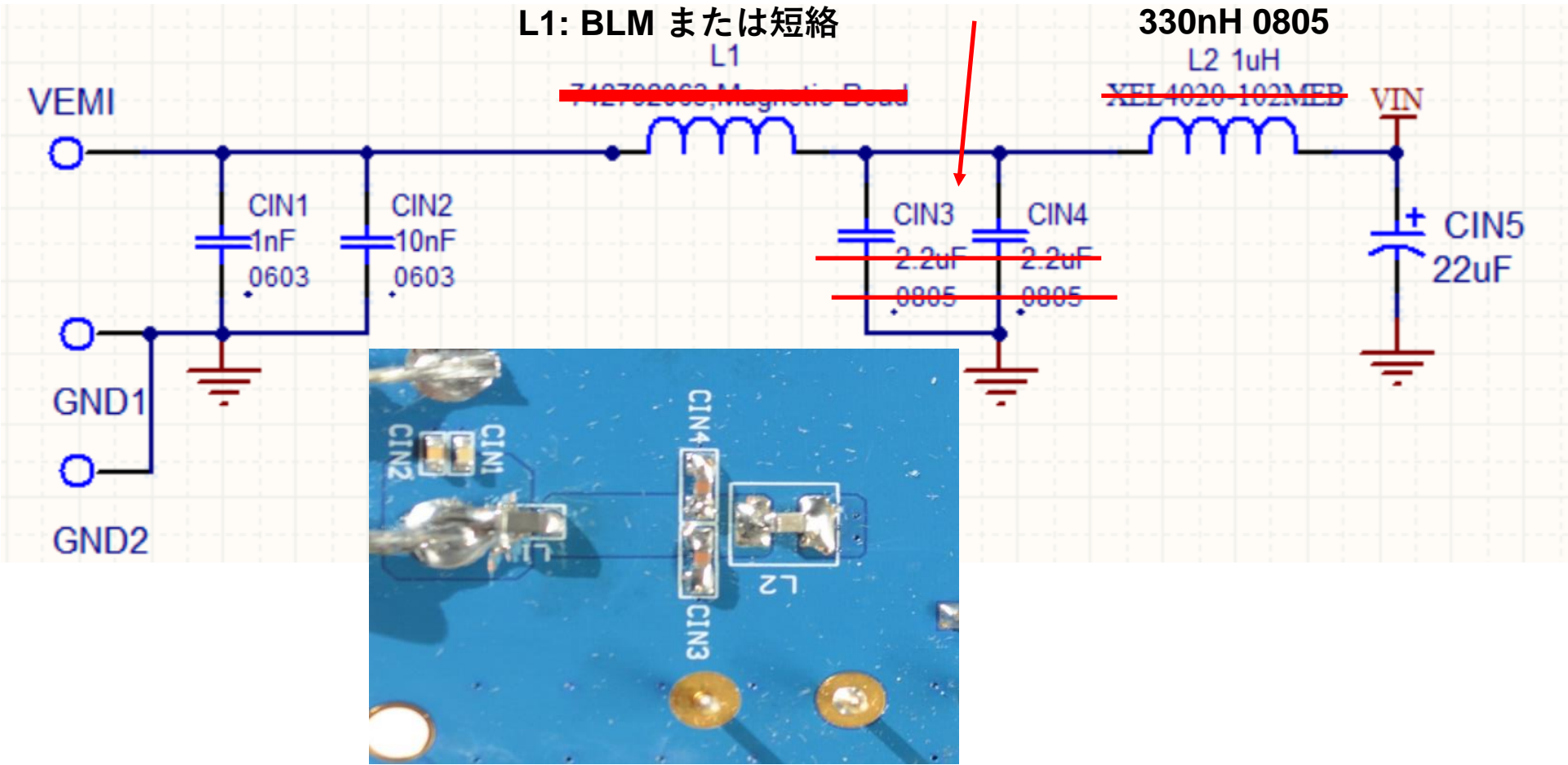
単純化した式:  $20 \log (Xc/(Xc + XL))$  at Fsw, 2x Fsw etc...

- 村田製作所はSimSurfing Suiteの一部としてフィルタシミュレータを保有
- 回路シミュレーションも同時に可能

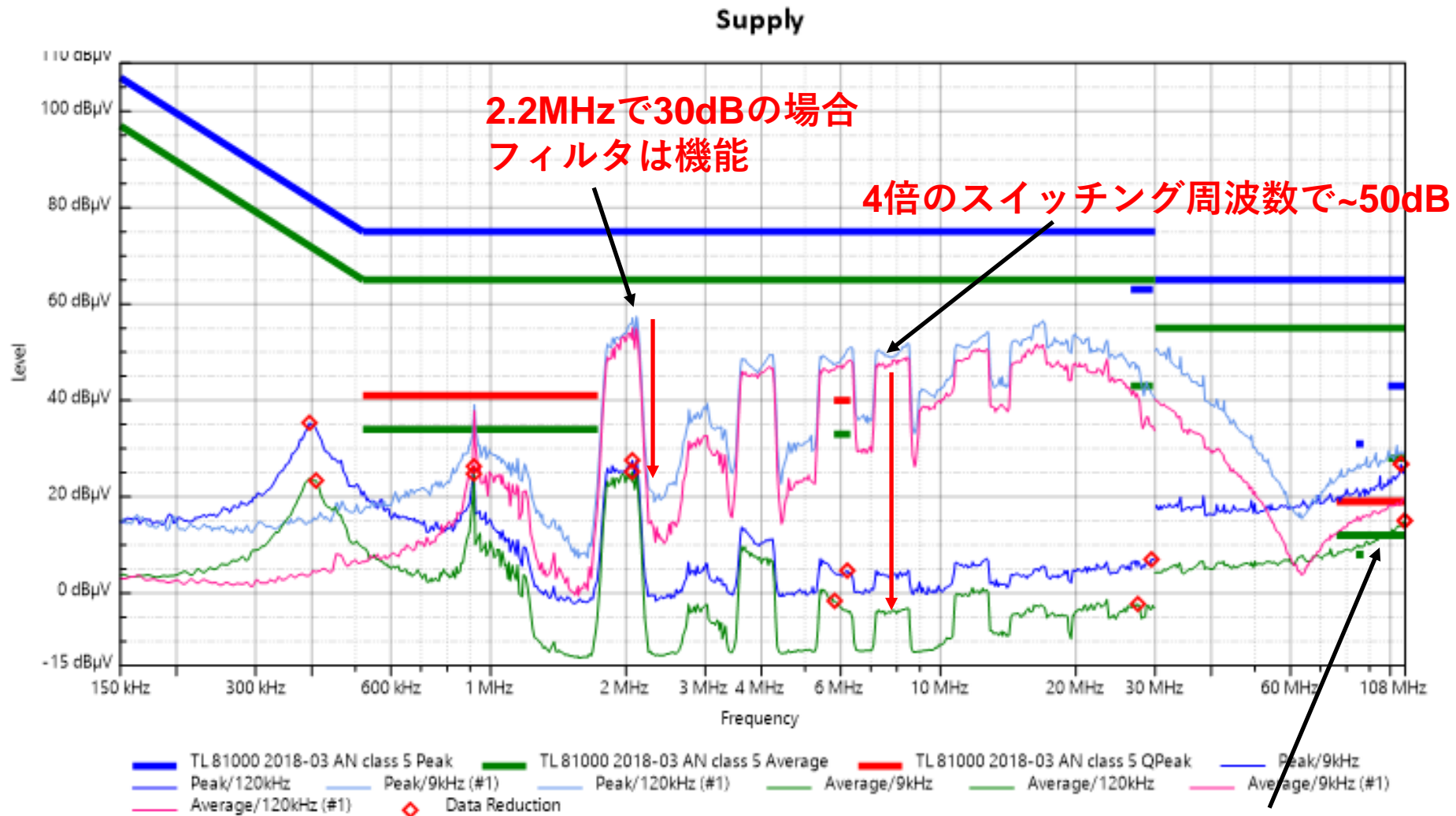
# 2MHz SSFM機能により、インプットフィルタ低減

このフィルタは33dBまで、2.2MHzでダンピング

CIN3/4= 470nF 0603

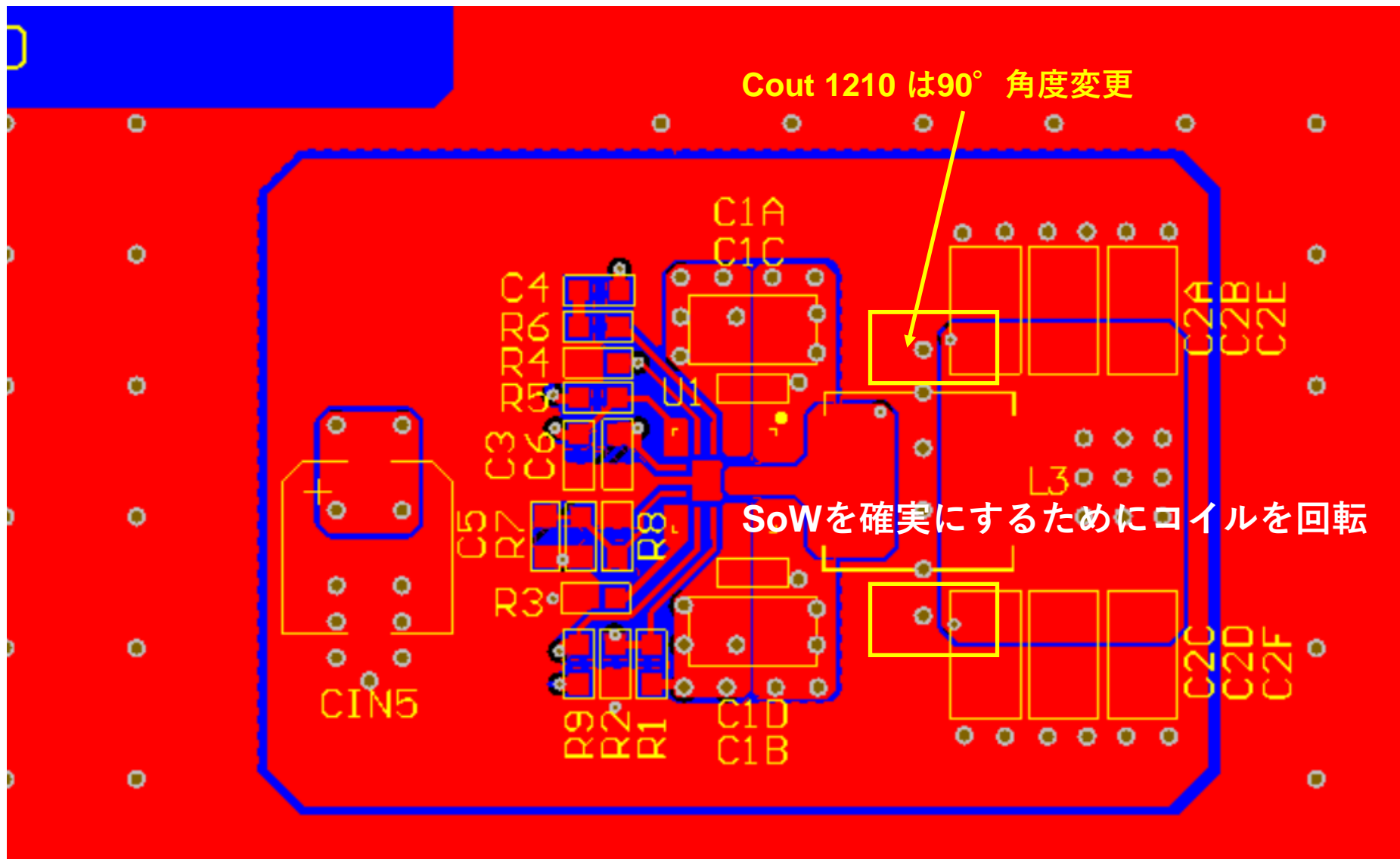


# CE試験 インプットフィルタ無し / 有りの比較



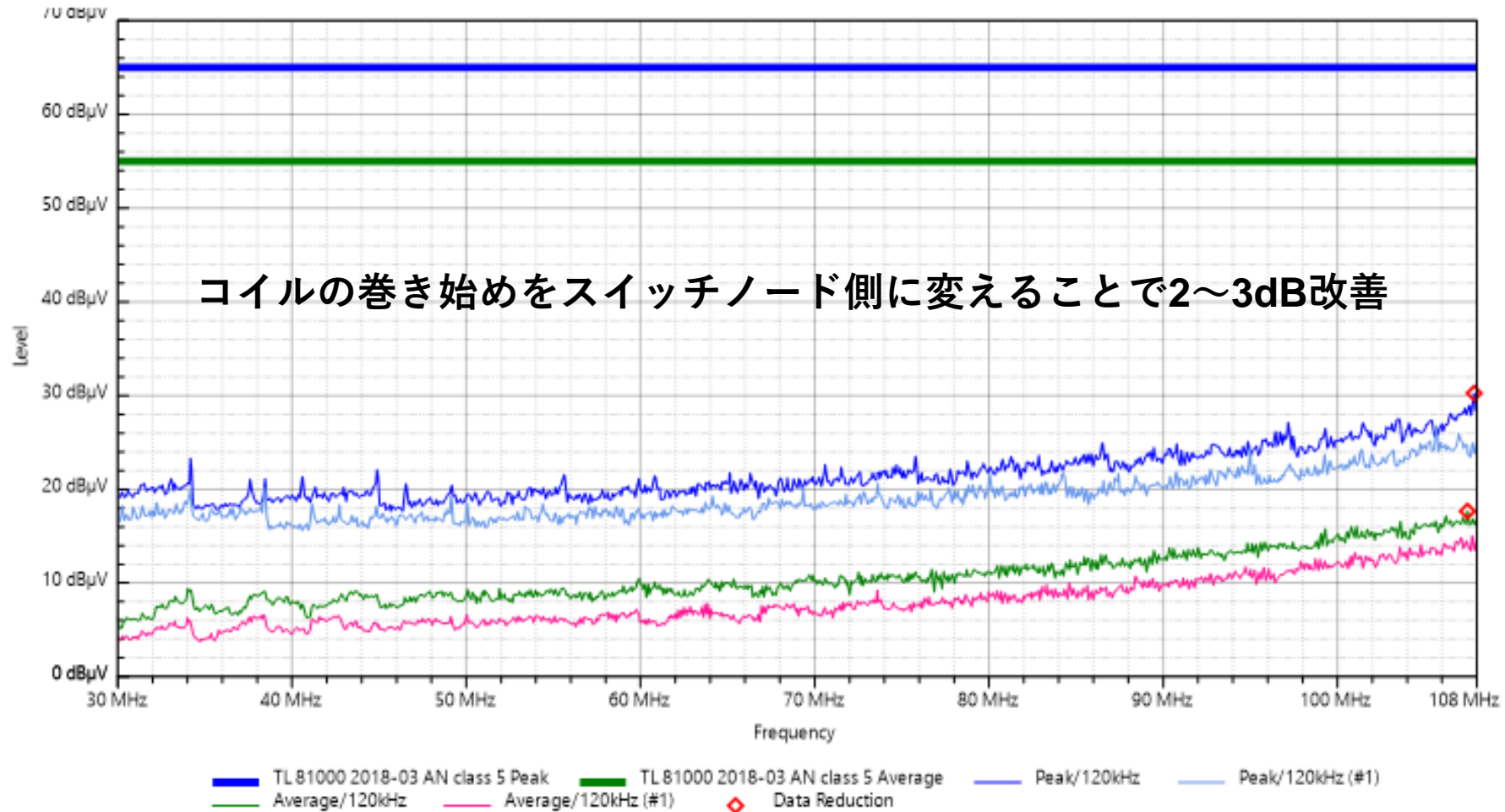
FM帯で十分なマージンがない

# トップレイヤの修正



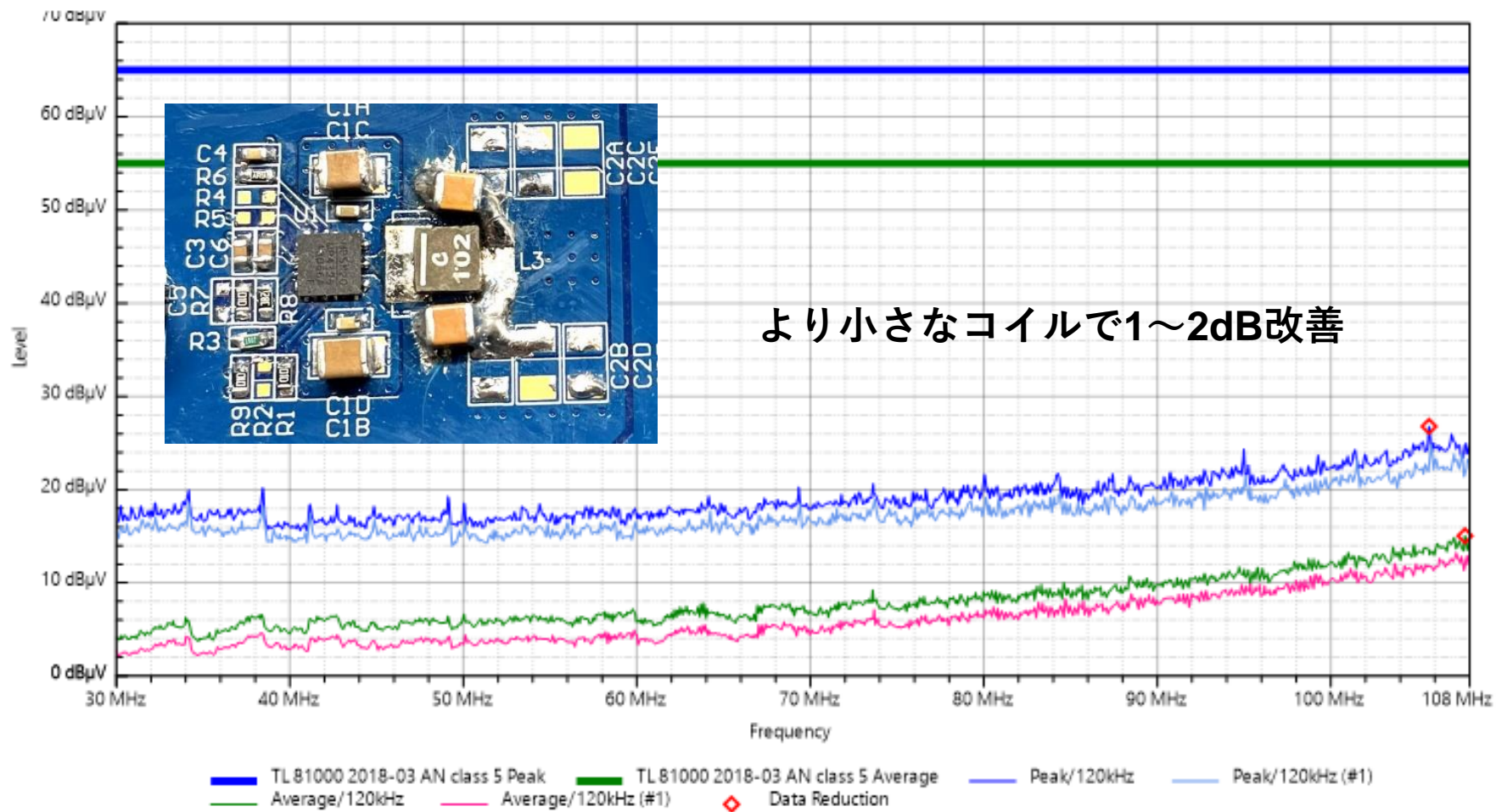
# XAL5030 双方向で1 $\mu$ H

B3



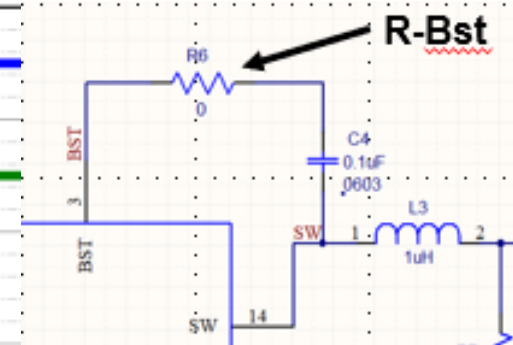
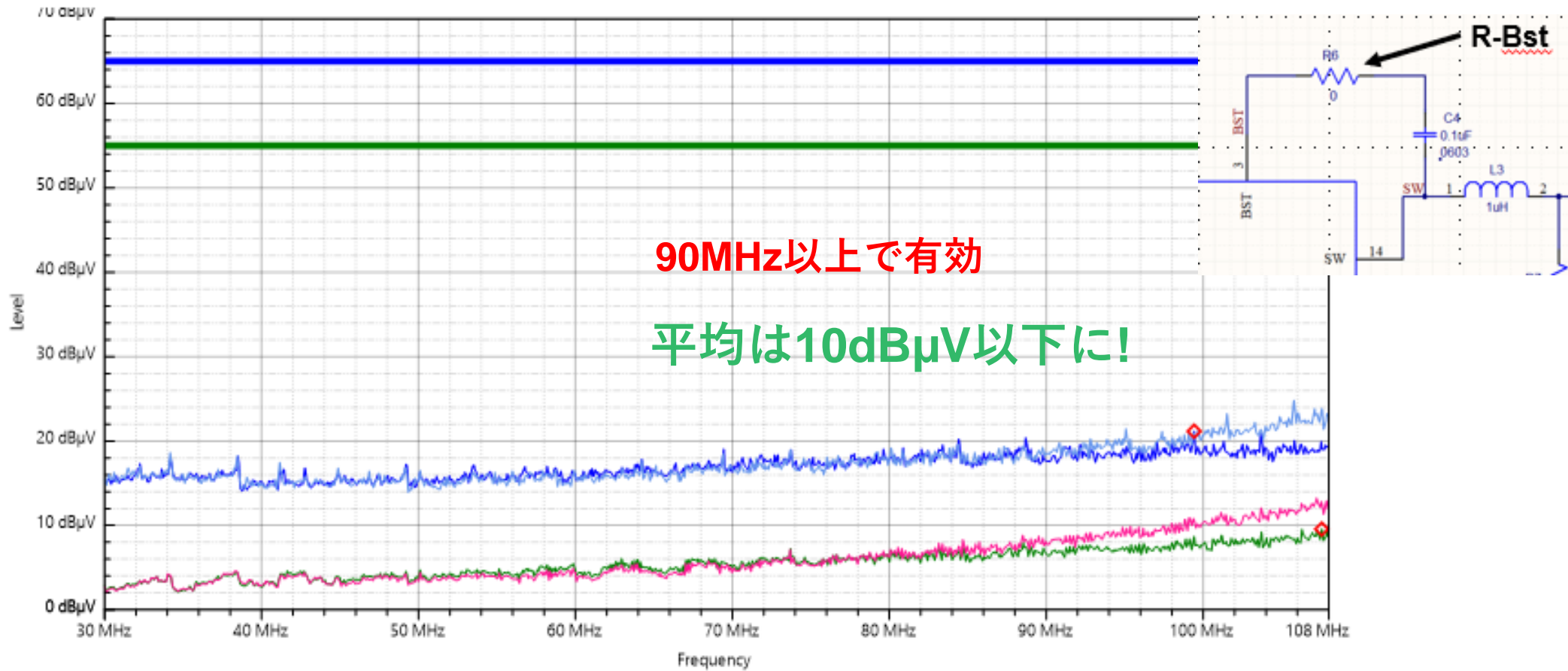
# XAL5030-1 $\mu$ HをXAL4020-1 $\mu$ Hに置き換え

B3



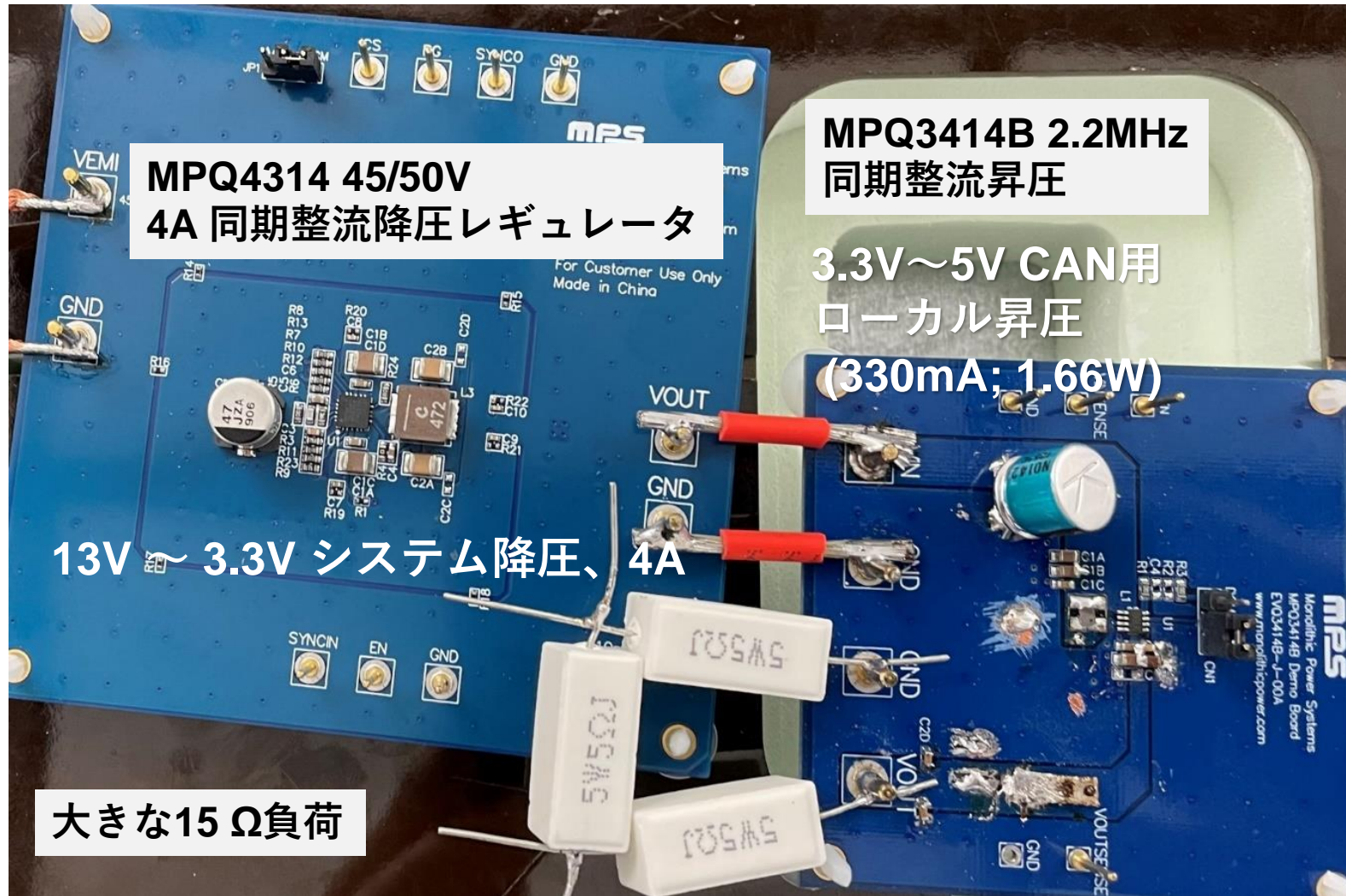
# BST回路に4.7 Ω追加

B3



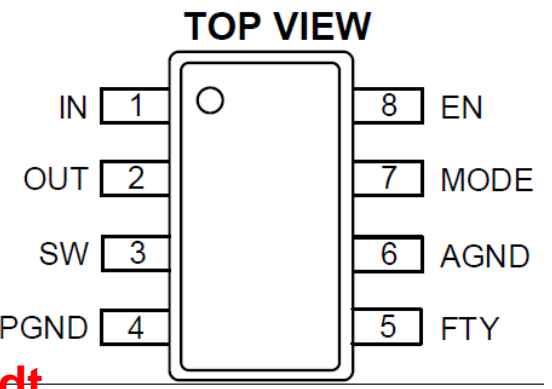
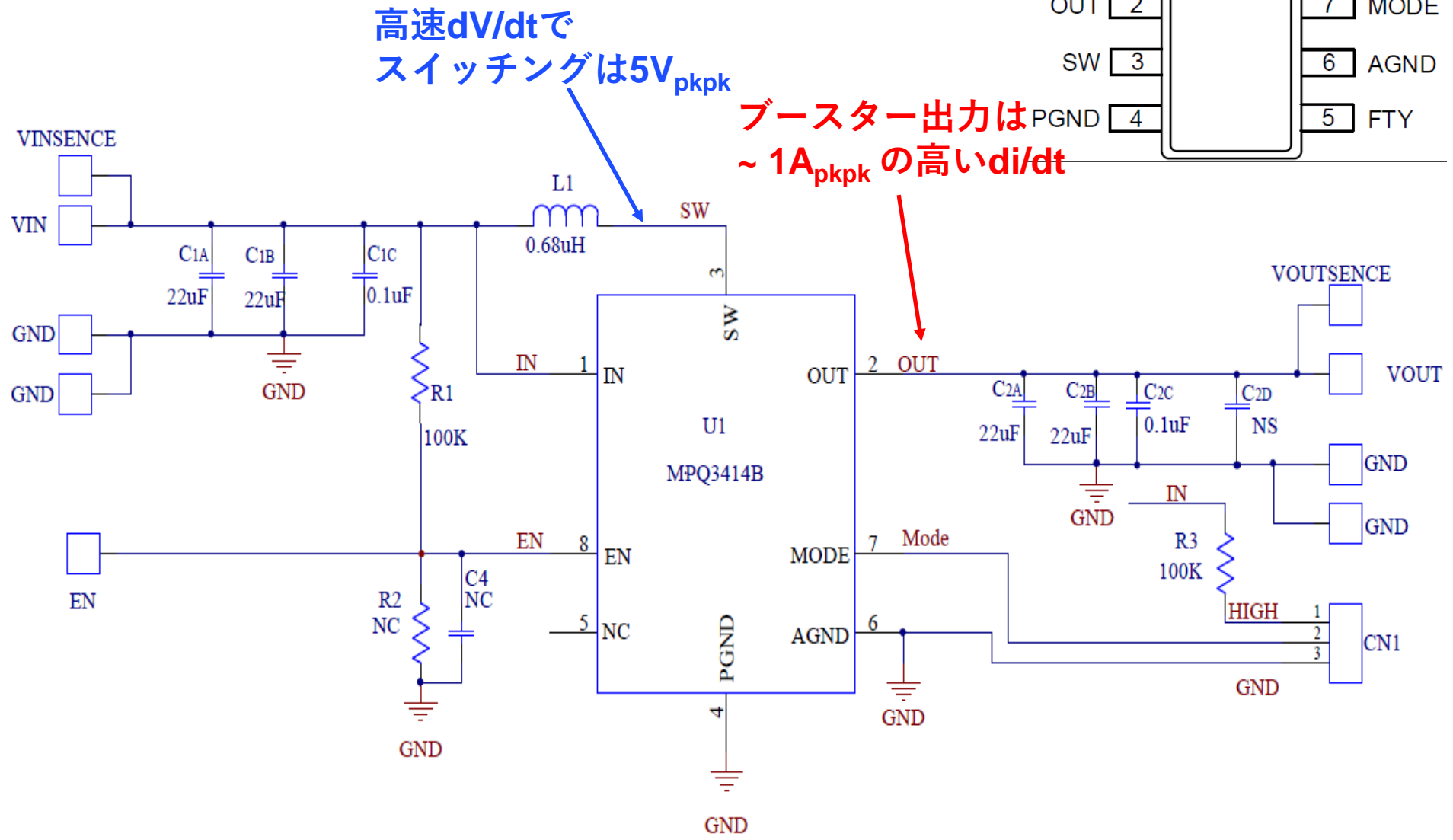
TL81000 2018-03 AN class 5 Peak TL81000 2018-03 AN class 5 Average Peak/120kHz Peak/120kHz (#1)  
Average/120kHz Average/120kHz (#1) Data Reduction

# MPSの例 2



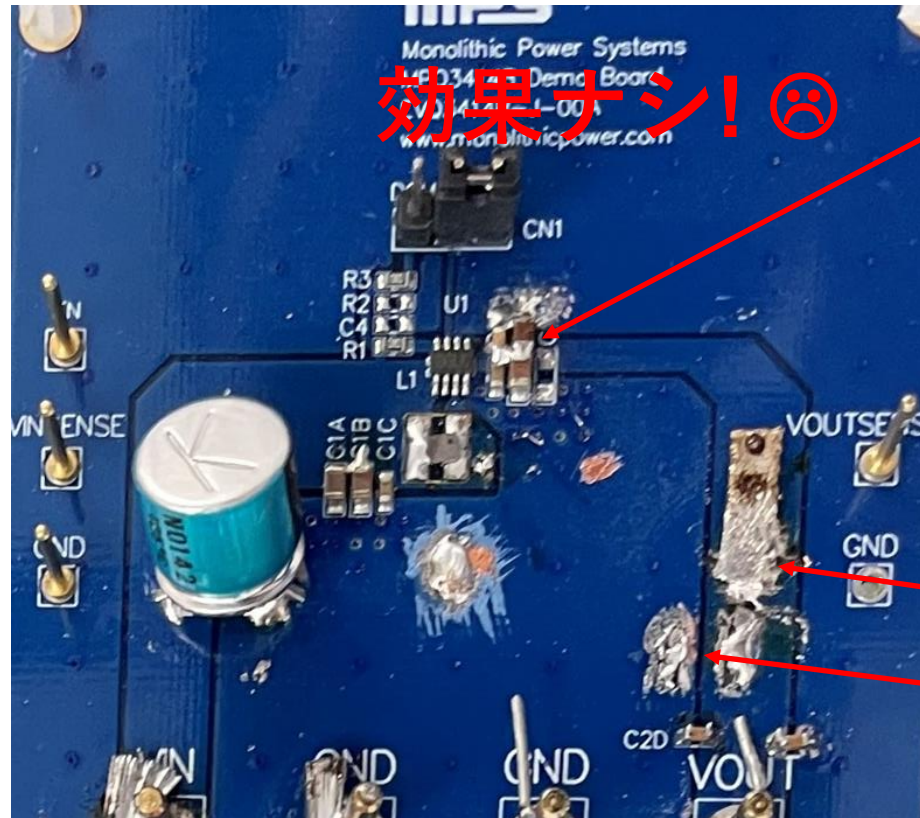


# MPQ314B 昇圧レギュレータ回路図



# 回路の修正

大きな負荷抵抗 (アンテナ) は直接ブースター出力とつなぐ  
最初の修正はLとCの出力フィルタ



効果ナシ! 😞

2つめの修正:  
半対象の位置にCoutを設置

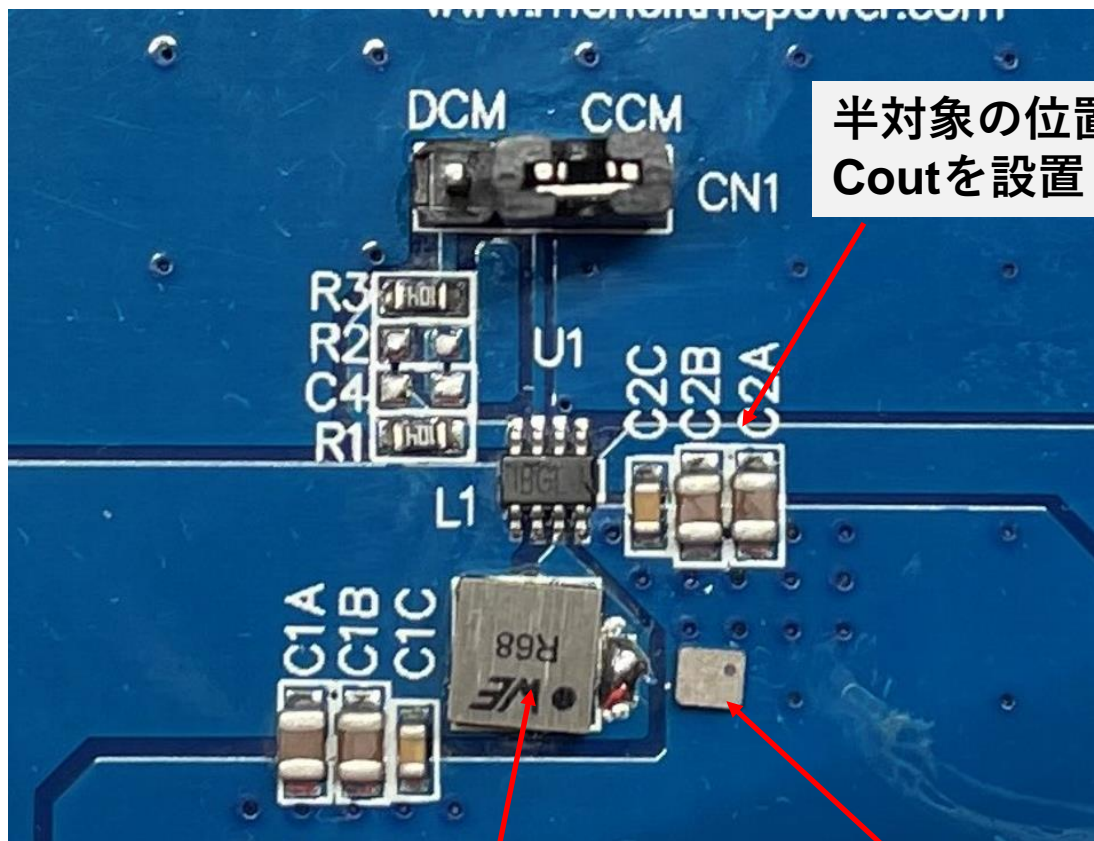
小型の330nHコイルを設置

1 $\mu$ F MLCCを設置

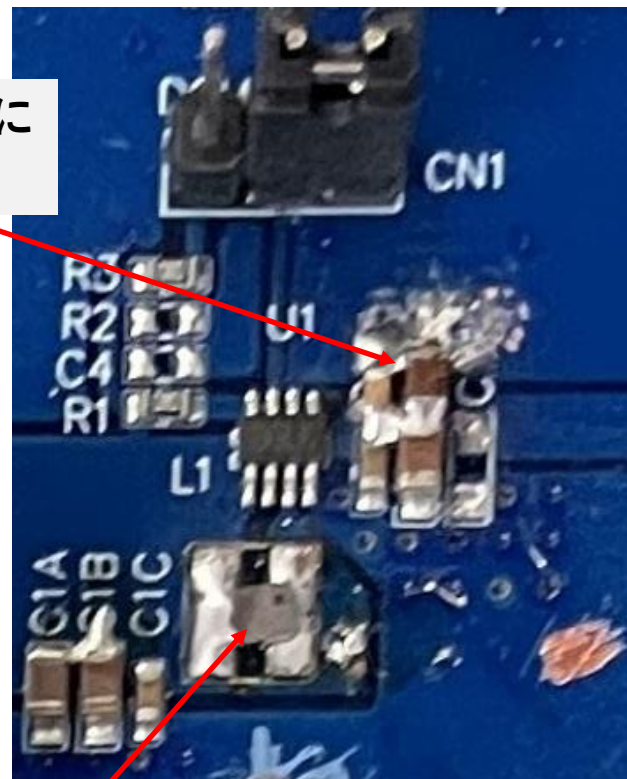
# オリジナルのMPSの評価ボードと修正済みボード

最初はMAPI4020  $I_{RMS}=8A$ かつ $8m\Omega$   
4 x 4 x 2mmサイズ

AT2010-R68 2 x 1.6 x 1mm  
 $41m\Omega$   $I_{RMS}=3.5A$ ;  $I_{SAT}=4.9A$



半対象の位置に  
Coutを設置

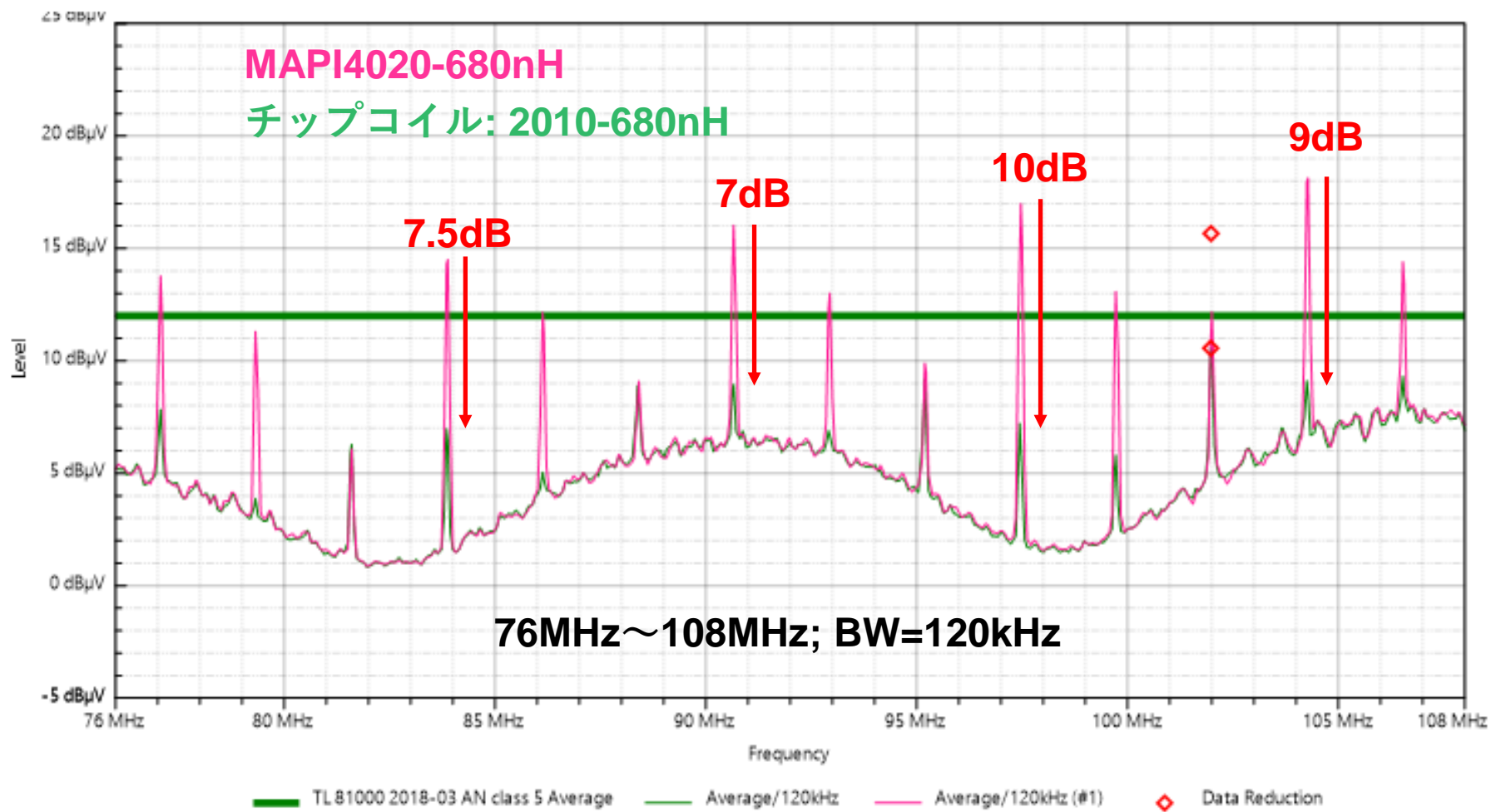


MAPI4020 680nH

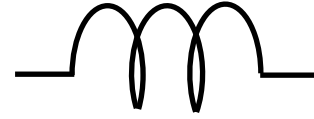
MPL-AT2010-R68

# OEMリミット付きCE平均テスト

3 - VHF



# パワーインダクタ



パワーインダクタの回路のシンボルはどれも同じ...



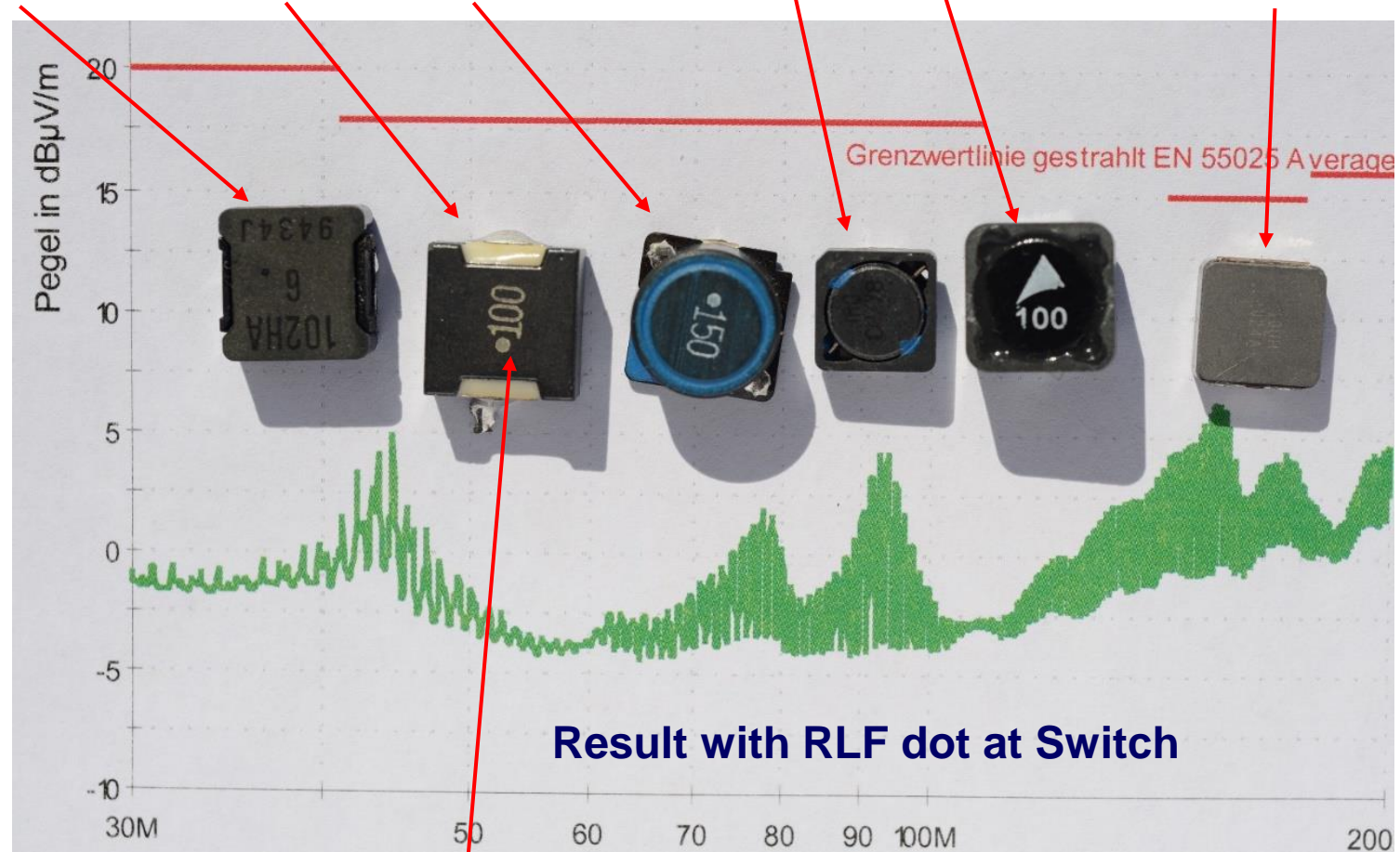
...でも構造が全く異なります!



EMC性能も大きく異なります!

# MPSの例3: パワーインダクタとEMCについて

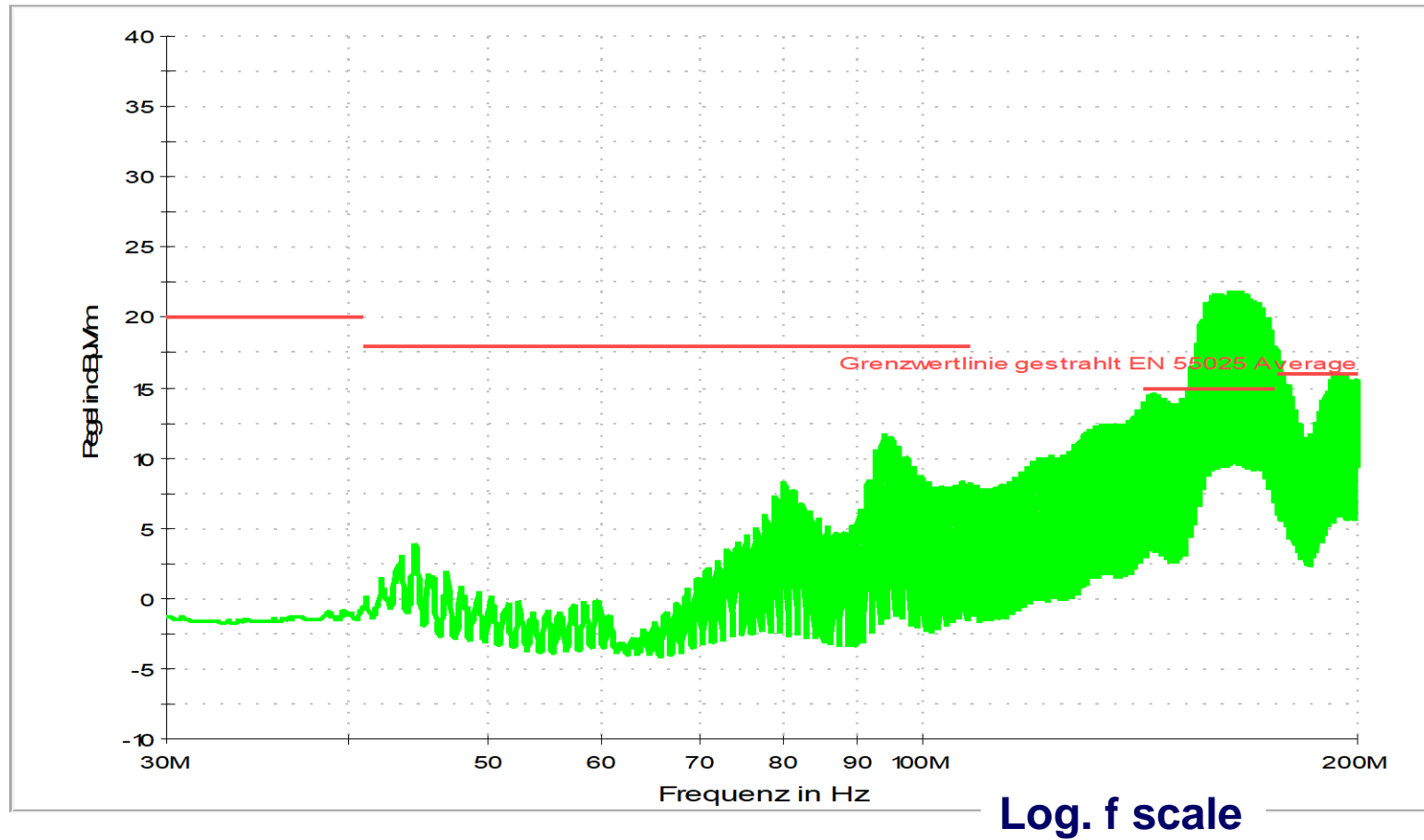
パナソニック、TDK RLFおよびSLF、Toko D104/124、Epcos & Vishay IHLP4040



コイル状のドットはワインディング開始のタイミングを示す

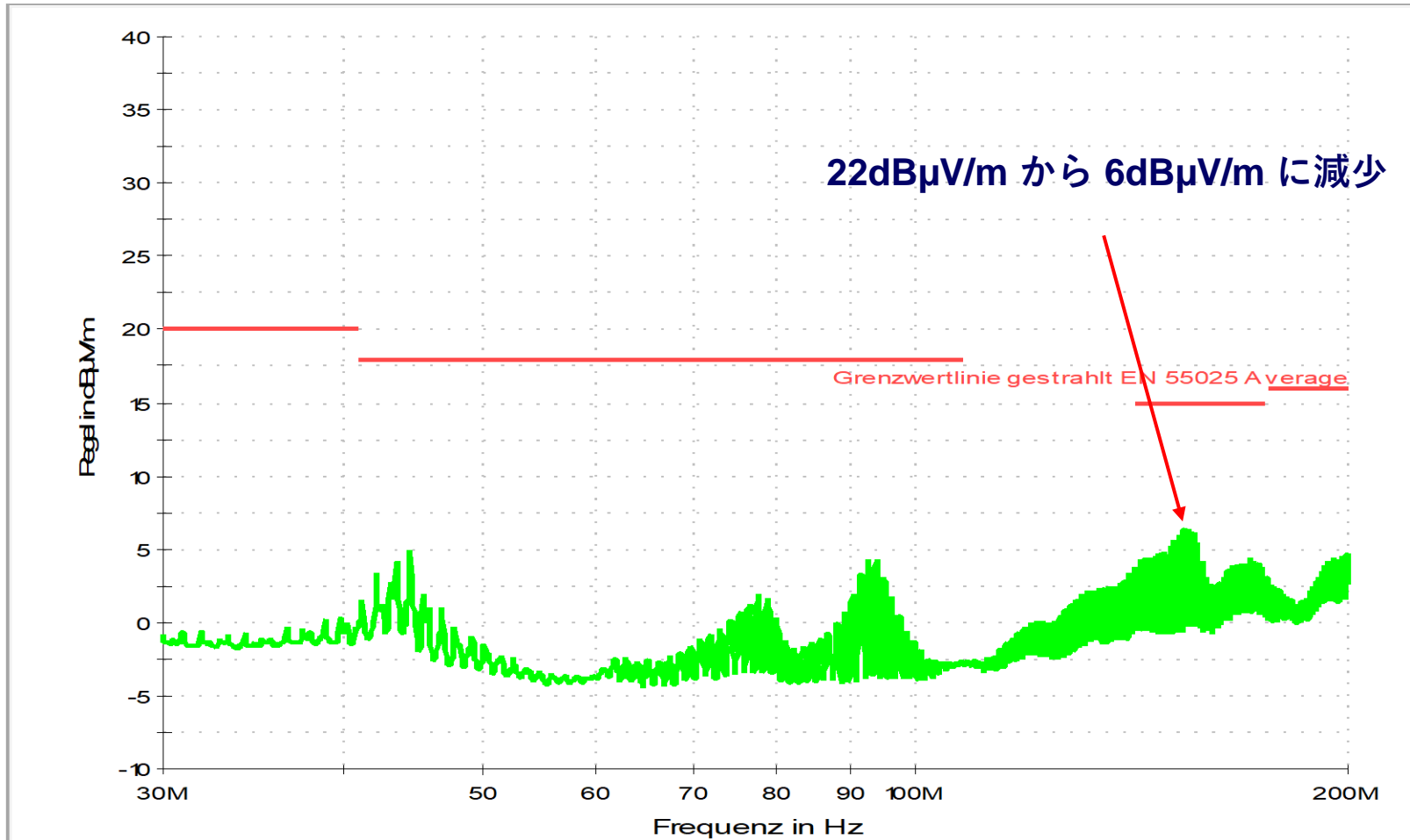
# パワーインダクタとEMCについて

## 成形インダクタ WE LHMI 10mm x 10mm



# パワーインダクタとEMCについて

## TDK SLF12575 スイッチ側にSoW

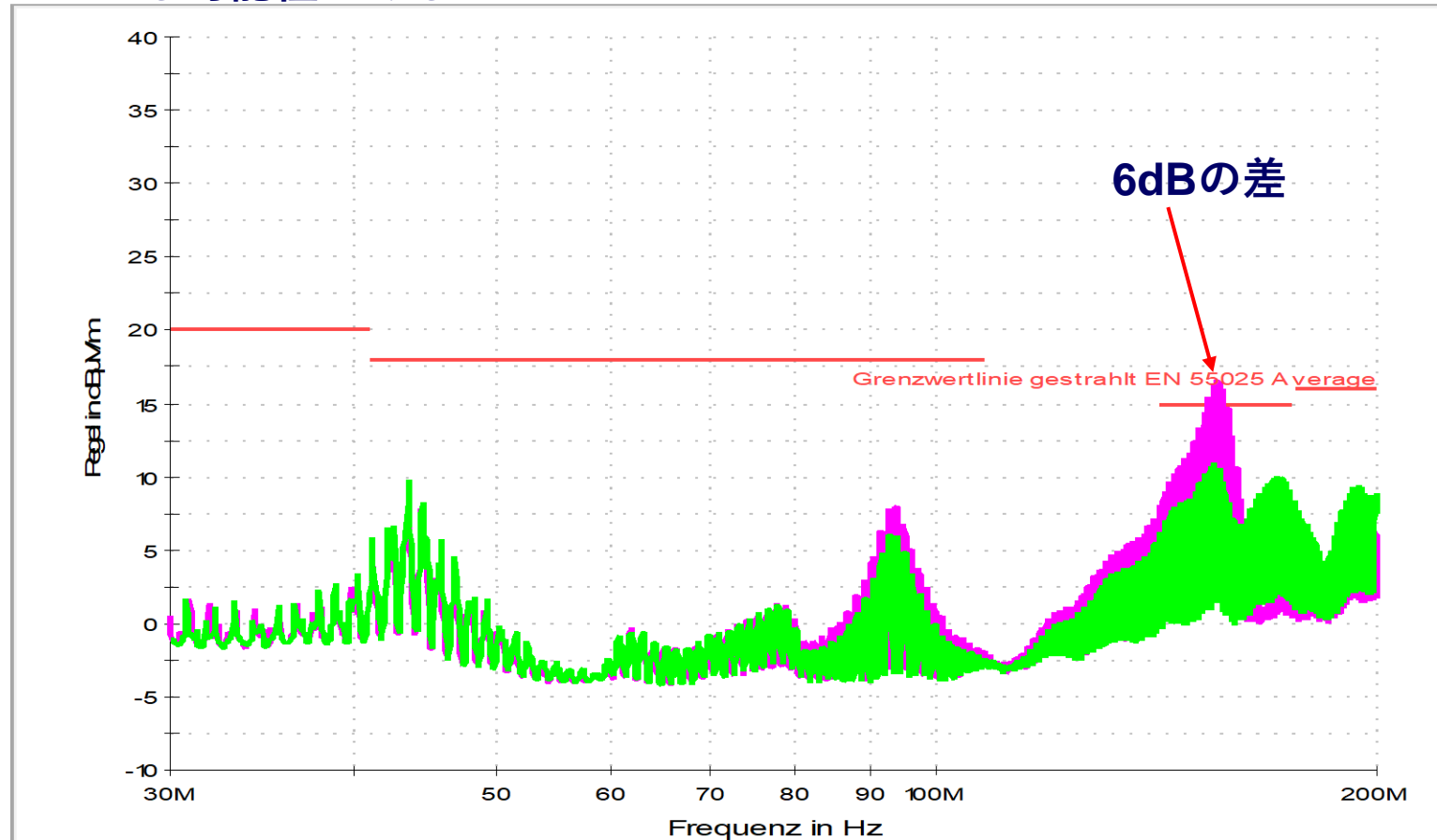




# パワーインダクタとEMCについて

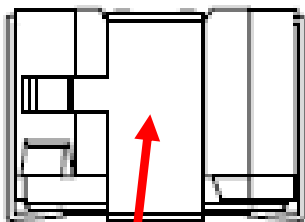
MnZnコア付きEpcosコイル。スイッチ側SoWと Vout側SoW

このMnZnコイルのコアには伝導性があり、VoutでのSoWでのより良い結果の理由となっている可能性がある

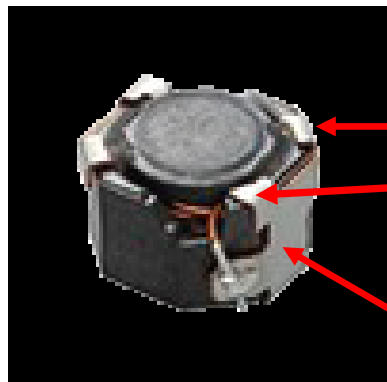


# パワーインダクタとEMCについて

高さ 4.5mm



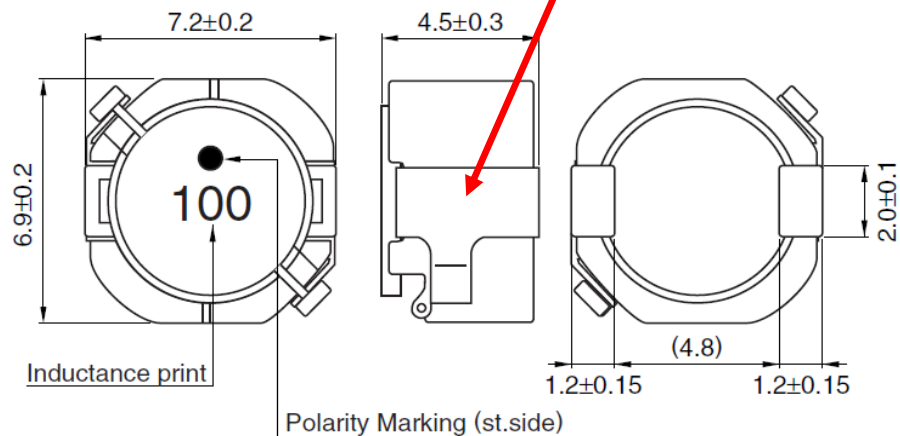
接触金属は  
スイッチノードdV/dt  
からのEフィールドの  
アンテナとして作用



ワインディング側の終端  
機械的堅牢性のためのエアギャップ  
を止める2つのクリップが付いた  
接触金属

SoWがSWサイドにあると  
プレートが問題の原因になりうる

SHAPES AND DIMENSIONS



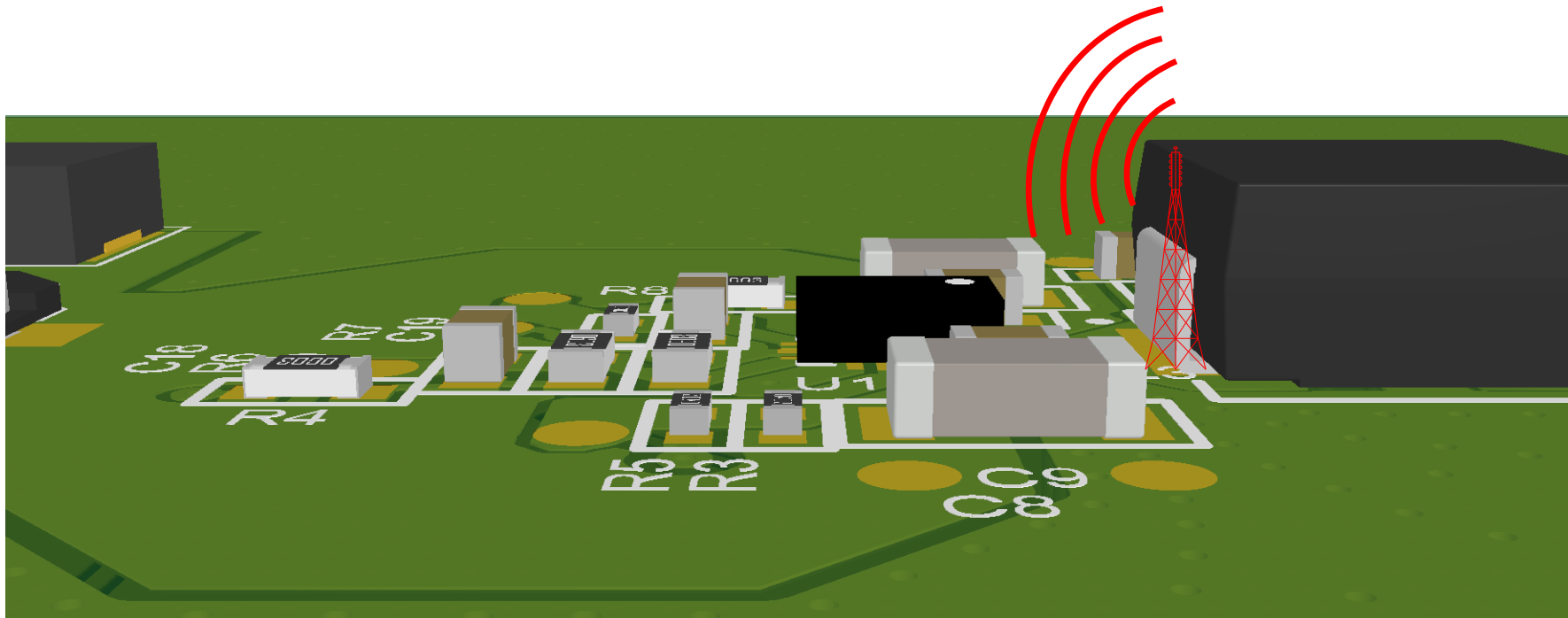
Weight: 0.72g

Dimensions in mm

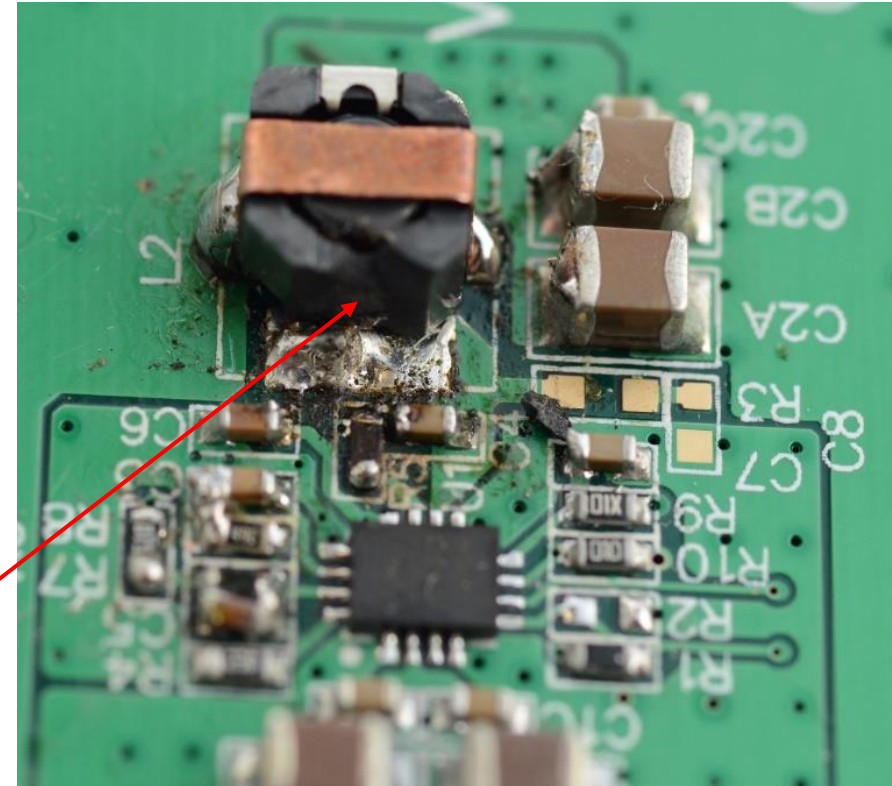
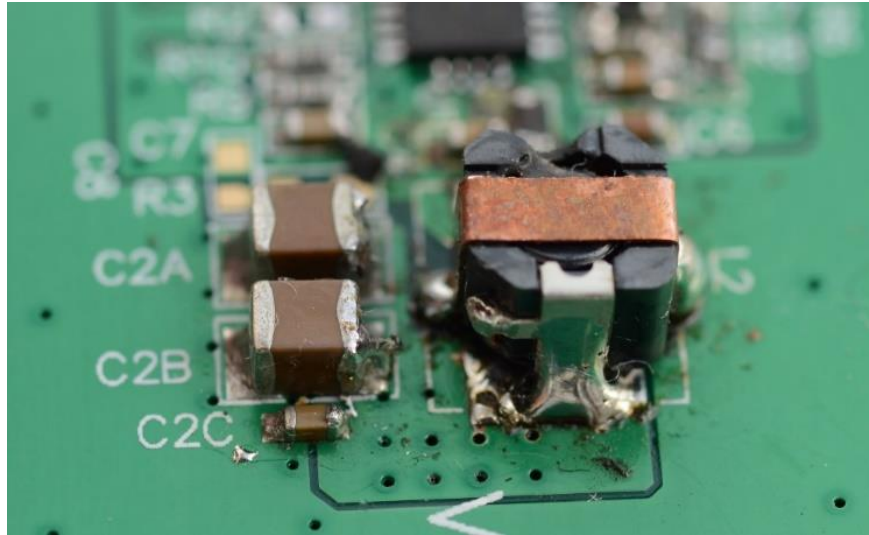
村田製作所、TDKおよびABCから引用



# パワーインダクタとEMCについて



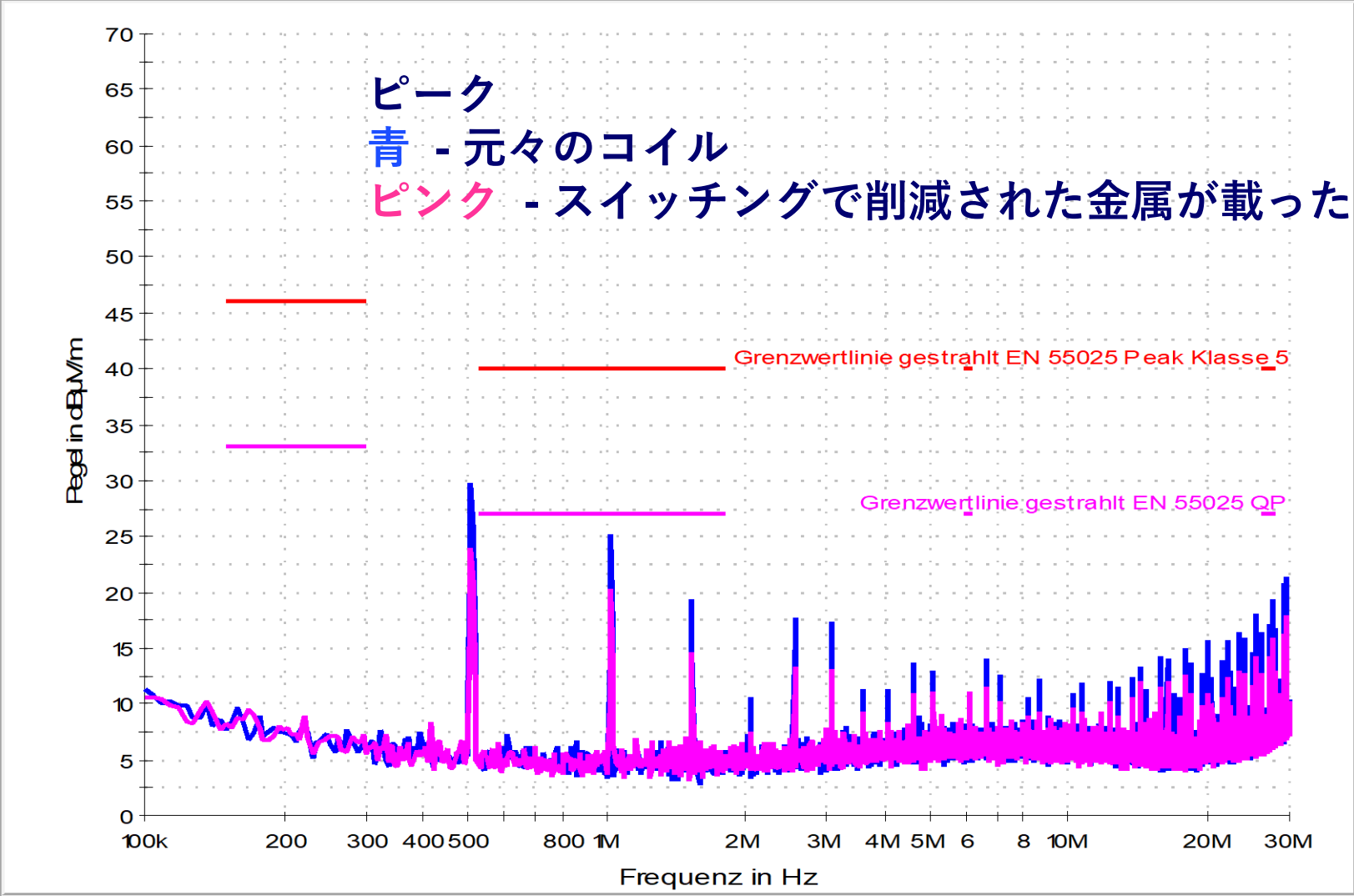
# パワーインダクタとEMCについて



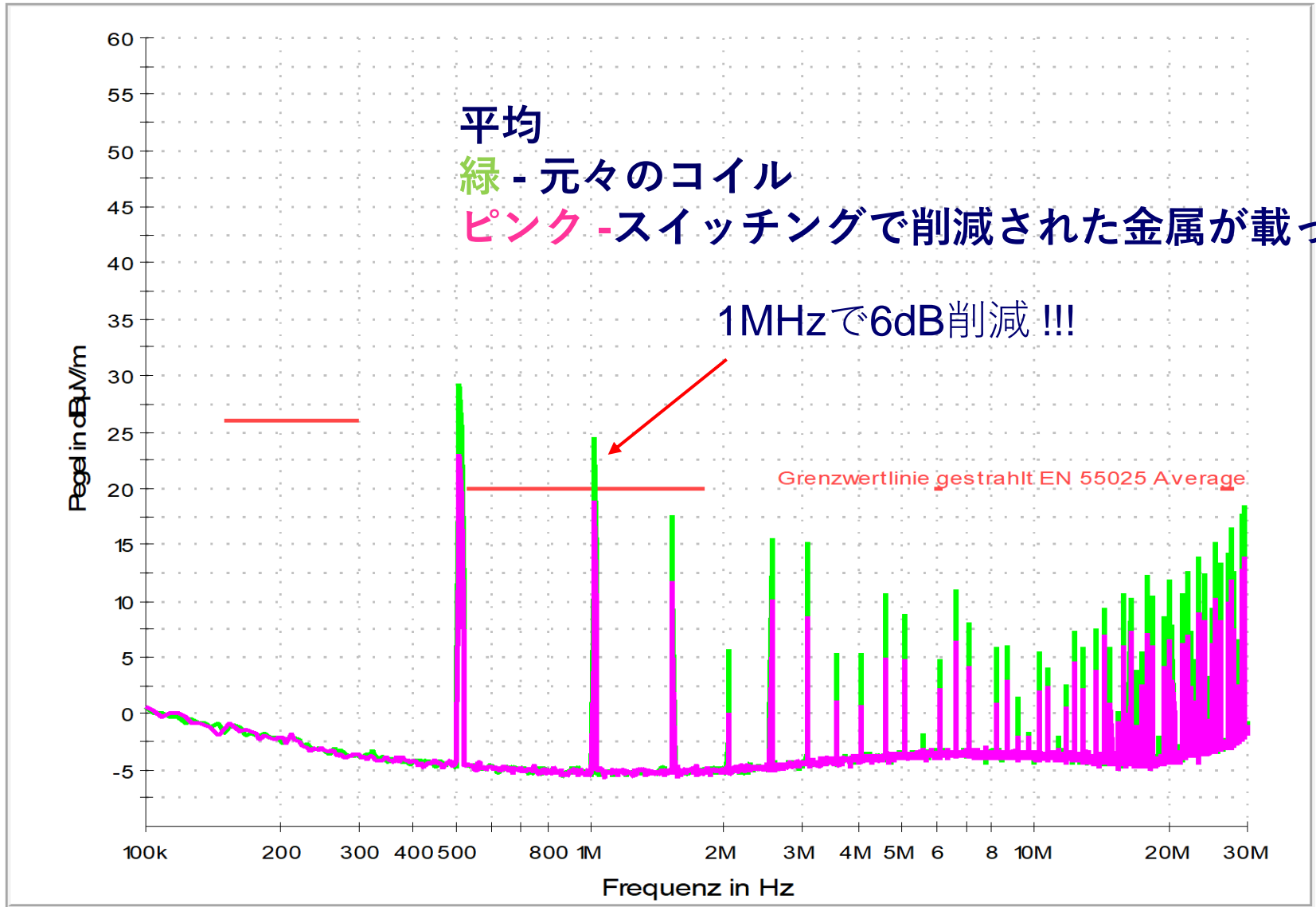
スイッチノードの接触プレートを削除:  
ワインディングをPCBに直接はんだ付け。  
モノポールアンテナ試験にて  
**1 MHz時6dB少ないエミッションとなった**

高さ4.5 mmの接触プレートはスイッチングノードの高いdV/dtで  
Eフィールドアンテナとして作用。  
最適なコイルは下部にスイッチングコンタクトをもつべき

# RE モノポール試験: 0.1MHz ~ 30MHz

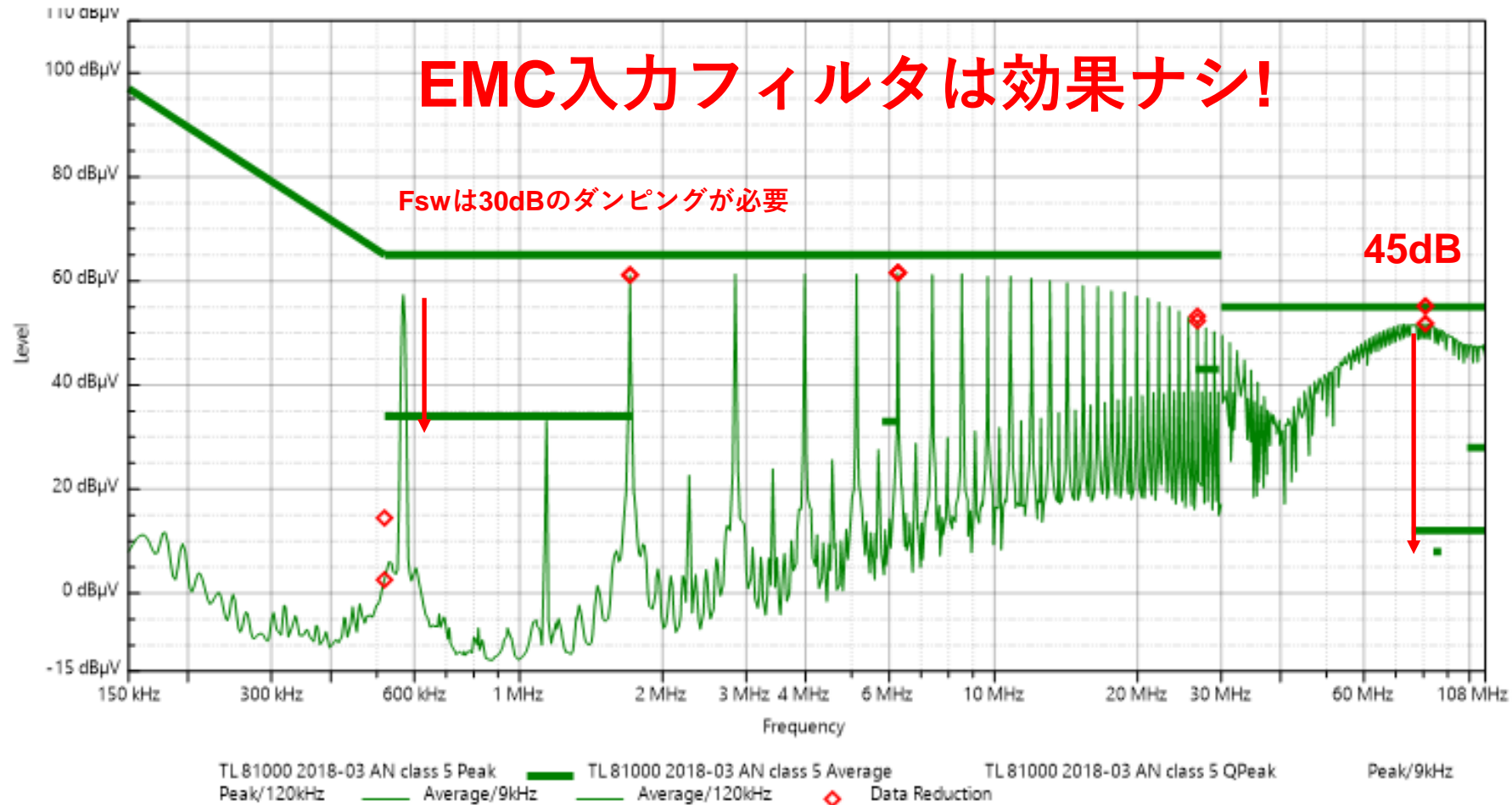


# RE モノポール試験: 0.1MHz ~ 30MHz



# MPSの例 6

絶縁型DC/DC、5W、CE平均値のみ表示



## MPSの例 5

- スナップオン方式のフェライトを使用した追加試験では改善ナシ
- オフ基板のEMCフィルタを使用した試験も改善ナシ
- 回路周辺の銅箔はやや改善アリ
- 一次および二次グラウンド間にYキャパシタ2.2nFを設置した場合、**大幅な改善アリ**
- さらなる回路やレイアウトの変更が主に次の手段として考えられる





- 有効性については**EMC**フィルタの構造をチェック
- 高 $di/dt$ 回路ノードについては**PCB**レイアウトを確認: ループは最小限に!
- 高 $dV/dt$ につながっている配置や部品を確認: 高 $dV/dt$ 領域は小さく薄く!
- 違うインダクタを試す。通常小さくより薄型のもものは輻射が少ない
- **DC/DC**とケーブルまたはコネクタの距離が近すぎる場合、**DC/DC**回路の上にローカルシールドを使うとよい